

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

FELIPE MARTINS MARQUES DA SILVA

ANÁLISE DE ERROS DEVIDOS A FATORES EXTERNOS NAS MEDIDAS  
REALIZADAS COM CÂMERA DE DISTÂNCIA PMD CAMCUBE 3.0

CURITIBA

2015

FELIPE MARTINS MARQUES DA SILVA

ANÁLISE DE ERROS DEVIDOS A FATORES EXTERNOS NAS MEDIDAS  
REALIZADAS COM CÂMERA DE DISTÂNCIA PMD CAMCUBE 3.0

Tese apresentada ao Curso de Pós-Graduação em  
Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra,  
Universidade Federal do Paraná, como requisito  
parcial para obtenção do título de Doutor em  
Ciências Geodésicas

Orientador: Prof. Dr. Jorge Antonio Silva Centeno

CURITIBA

2015

## TERMO DE APROVAÇÃO

FELIPE MARTINS MARQUES DA SILVA

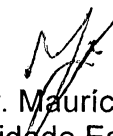
“ANÁLISE DE ERROS DEVIDOS A FATORES EXTERNOS NAS MEDIDAS  
REALIZADAS COM CÂMERA DE DISTÂNCIA PMD CAMCUBE 3.0”

Tese nº 98 aprovada como requisito parcial do grau de Doutor no Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra da Universidade Federal do Paraná, pela seguinte banca examinadora:


Orientador:



Prof. Dr. Jorge Antonio Silva Centeno  
Departamento de Geomática, UFPR




Prof. Dr. Mauricio Galo  
Universidade Estadual Paulista, UNESP



Prof. Dr. Wilson Alcantara Soares  
Departamento de Física, UFPR



Prof. Dr. Alex Spria Medina  
Departamento de Geomática, UFPR



Prof. Dr. Álvaro Muriel Lima Machado  
Departamento de Geomática, UFPR

Curitiba, 28 de setembro de 2015.

## DEDICATÓRIA

À toda a minha família, tios, avós, primos, sogros...  
à minha esposa Diana e sua (nossa) família.  
aos meus pais, José Antônio e Maria do Carmo.  
a meu irmão, Fernando, e sua esposa, Evelise,  
e ao meu orientador, Centeno.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, por tudo.

Ao meu orientador Jorge Antônio Silva Centeno, pelos ensinamentos, tanto na área acadêmica quanto na vida.

A todos os professores do Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da UFPR, pelos ensinamentos.

A todos os colegas de curso, pela parceria e amizade.

A CAPES e ao CNPQ, pelo consentimento das bolsas de estudos.

## RESUMO

Um dos recentes equipamentos desenvolvidos para o Sensoriamento Remoto são as câmeras de distância, conhecidas como *range cameras* ou *TOF cameras*. Tais câmeras também obtém a distância sensor-alvo, assim como os aparelhos de *laser scanning*, entretanto não possuem equipamentos de varredura, capturando imagens quadro a quadro.

A medidas obtidas com tais câmeras estão sujeitas à diversas fontes de erros instrumentais e ambientais. Dentre as fontes de erros existentes, esta Tese focou no estudo dos erros causados pela iluminação ambiente, pela refletividade do alvo e pela distância câmera-alvo, além de verificar o tempo de aquecimento necessário para se atingir maior precisão/exatidão nas medidas da câmera.

Foi utilizado uma câmera PMD Camcube 3.0, que permite obter imagens de intensidade, distância e amplitude, com 200 x 200 pixels, em um sensor CMOS (*Complementary Metal Oxide Semiconductor*). Para medir a distância para cada pixel da imagem, este equipamento utiliza o princípio *time-of-flight* (TOF) com base no método de diferença de fase.

Os experimentos mostraram que a câmera necessita de, pelo menos, 40 minutos de aquecimento para atingir a estabilidade das medidas. A distância câmera-alvo influenciou o erro das medidas através de um comportamento oscilatório atenuada com o aumento da distância, sendo modelado pela equação da onda, com amplitude atenuada. Os erros devido à iluminação ambiente apresentaram variação linear proporcional à intensidade da iluminação ambiente. Por último, quanto à refletividade do alvo, verificou-se que alvos mais escuros apresentaram maior ruído e que, comparando com alvo de cor branca, a mudança na refletividade do alvo, por meio das cores cinza ou preta, aumentou significativamente os erros dos valores da distância.

## **ABSTRACT**

One of the latest equipment developed for Remote Sensing distance are the cameras, known as range camera or TOF cameras. Such cameras also obtains the distance between the sensor and its target, as well as laser scanning devices, however have no scanning equipment, capturing images frame by frame.

The measurements obtained with this camera are subject to several sources of instrumental and environmental errors. Among these errors sources, this thesis focused on the study of the errors caused by ambient lighting and by reflectivity of the target (environmental) by the camera target distance, and checking the heating time required to achieve higher precision / accuracy in measurements camera. A PMD Camcube 3.0 camera that obtains intensity images was used, distance and amplitude, with 200 x 200 pixels on a CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor). To measure the distance for each pixel in the image, this equipment uses the time-of-flight (TOF) principle, based on the phase difference method.

The experiments showed that the camera needs, at least, 40 minutes heating to achieve stable measurements. The error due to distance between camera and the target behaves as an attenuated wave, that decreases as the distance get higher. The errors due to ambient lighting showed a linear variation, proportional to the intensity of the ambient lighting. Finally, about the errors of target reflectivity, the darker the target, the greater the noise. Compared with white target, the change in reflectivity of the target, by means of gray or black color, significantly increased distance values.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação da diferença de fase ( $\varphi$ ).....	19
Figura 2 – Representação da correlação cruzada entre o sinal emitido (quadrático) e o sinal de retorno (senoidal) para os instantes (a) $\tau_0 = 0$ , (b) $\tau_1 = p / 2$ , (c) $\tau_2 = p$ e (d) $\tau_3 = 3p / 2$ ; (e) curva representativa da função da correlação cruzada. ....	20
Figura 3 – Ilustração do funcionamento do sensor CCD e do sensor CMOS. ....	22
Figura 4 – Funcionamento de um sensor PMD. ....	23
Figura 5 – Imagens de distância, intensidade e amplitude para os Tempos de Integração $100 \mu s$ , $2000 \mu s$ e $4000 \mu s$ . ....	24
Figura 6 – Distâncias para determinação do valor do Erro de Zero. ....	28
Figura 7 – Fontes de erro em câmeras de distância. ....	30
Figura 8 – Relação entre o tempo de integração e o valor da distância calculada. ....	32
Figura 9 – Matriz FPN para um determinado tempo de integração. ....	33
Figura 10 – Efeito " <i>vignetting</i> " na imagem de distância. ....	35
Figura 11 – Regiões com refletividades distintas, terão distâncias registradas com valores distintos. ....	35
Figura 12 – Imagem de distância de uma folha de papel, metade branca (esquerda) e metade preta (direita). ....	36
Figura 13 – Multicaminho: o sinal emitido não percorre, simplesmente, o caminho de ida e volta a um alvo único, mas é refletido por outros alvos da cena, causando erros no valor calculado das distâncias. ....	37
Figura 14 – Locais de ocorrência de multicaminho. (a) e (b) As bordas de uma xícara em frente à parede são pontos propícios à ocorrência de multicaminho e ao surgimento de pixels flutuantes. (c) Concavidades na cena, como a que surge do encontro de duas superfícies planas, também são locais propícios para a ocorrência de multicaminho. ....	37
Figura 15 – Representação do erro devido à distorção por espalhamento interno. ....	38
Figura 16 – Visualização do erro devido ao espalhamento interno. (a) Imagem óptica da cena (b) Imagem de distância do alvo posterior, sem o alvo anterior; (c) imagem de distância com alvo anterior; (d) diferença entre as imagens "b" e "c". ....	39



Figura 17 – Erros de distância e amplitude na câmera SR 3000 devido à distorção por espalhamento interno, em função da área coberta pela superfície do alvo anterior sobre o alvo posterior. ....	40
Figura 18 – Erros de distância e amplitude devido à distorção por espalhamento interno, em função do tempo de integração, para a câmera SR 3000. ....	41
Figura 19 – Erros de distância e amplitude devido à distorção por espalhamento interno, em função da distância do alvo anterior até a câmera. ....	41
Figura 20 – Ocorrência de pixels flutuantes. (a) Imagem de intensidade; (b) Imagem de distância, com pixels flutuantes em vermelho. ....	42
Figura 21 – Ilustração da ocorrência de pixels flutuantes entre as faces de dois objetos a diferentes distâncias da câmera. ....	43
Figura 22 – O ângulo de incidência do sinal ( $\alpha$ ) sobre o alvo, em graus. ....	45
Figura 23 – Imagens tomadas para diferentes ângulos de incidência. ....	46
Figura 24 – Gráfico relacionando a média e o ângulo de incidência. ....	47
Figura 25 – Gráfico relacionando o desvio padrão e o ângulo de incidência. ....	47
Figura 26 – Efeito cíclico: gráfico relacionando o erro da medida e a distância real..	48
Figura 27 – (a) Populações estatisticamente iguais; (b) Populações estatisticamente diferentes.....	53
Figura 28 – Regiões de rejeição e não rejeição da hipótese nula, para distribuição normal padrão, em teste bilateral.....	54
Figura 29 – Câmera PMD CamCube 3.0 do Departamento de Geomática da UFPR, com fontes de iluminação LED acopladas nas laterais: (a) vista em perspectiva da câmera; (b) vista frontal da câmera, mostrando os 48 LEDs em cada fonte de iluminação, à esquerda e à direita da câmera.....	56
Figura 30 – Interferômetro Laser, com mostrador digital das medidas e trilhos por onde corre o alvo.....	58
Figura 31 – (a) Alvo do Experimento 1: chapa de madeira ; (b) Alvo do Experimento 2: parede; (c) Alvo do Experimento 3: folha na parede. ....	59
Figura 32 – Luxímetro ICEL SP-2000 utilizado no experimento de iluminação ambiente. ....	59
Figura 33 – (a) Lâmpada halógena Halopar 38 ; (b) <i>Dimmer</i> modular universal. ....	60
Figura 34 – Ilustração da coleta de imagens com a câmera PMD CamCube. ....	64

Figura 35 – Fotos do experimento:(I) câmara de distância sobre tripé; (II) alvo sobre o refletor móvel do interferômetro; (III) alvo na posição mais distante. ....	64
Figura 36 – Ilustração do Experimento 2, para iluminação ambiente. ....	64
Figura 37 – Configurações da coleta de imagens. ....	66
Figura 38 – Regiões de rejeição ou não rejeição de $H_0$ , a 5% de significância: $Z = 1,96$ . ....	67
Figura 39 – (a) Visão lateral do experimento; (b) Visão posterior do experimento. ....	67
Figura 40 – Câmera posicionada em frente aos alvos: (a) Preto; (b) Cinza e; (c) Branco. ....	68
Figura 41 – Variação da distância ao longo do tempo. ....	70
Figura 42 – Variação do desvio padrão ao longo do tempo. ....	71
Figura 43 – Gráfico distância teórica vs. distância medida, para todos os tempos de integração (TI), desde $TI=100\mu s$ até $TI=4000\mu s$ , variando de $100\mu s$ em $100\mu s$ . ....	72
Figura 44 – Gráfico Erro vs. Distância teórica para todos os tempos de integração (TI), desde $TI=100\mu s$ até $TI=4000\mu s$ , variando de $100\mu s$ em $100\mu s$ . ....	73
Figura 45 – Gráfico Erro vs. Distância para $TI=100\mu s$ até $TI=500\mu s$ . ....	73
Figura 46 – Gráfico Erro vs. Distância para $TI=600\mu s$ até $TI=4000\mu s$ . ....	74
Figura 47 – Gráfico Erro vs. Distância para $TI=2000\mu s$ até $TI=4000\mu s$ . ....	75
Figura 48 – Gráfico relacionando o erro de distância e a distância teórica, para $TI=4000\mu s$ . ....	75
Figura 49 – Gráfico para o 1º modelo, com amplitude como uma função linear. Em linha cheia, tem-se a curva original dos erros. Em linha tracejada, a curva obtida com o modelo de correção. ....	76
Figura 50 – Gráfico relacionando a distância observada ou a distância calculada e a distância teórica, com o primeiro modelo cuja amplitude varia linearmente. ....	78
Figura 51 – Gráfico para o 2º modelo, com amplitude como função exponencial de base e. Em linha cheia, tem-se a curva original dos erros. Em linha tracejada, a curva obtida com o modelo de correção. ....	79
Figura 52 – Gráfico relacionando a distância observada ou a distância calculada e a distância teórica, com o primeiro modelo cuja amplitude varia linearmente. ....	80
Figura 53 – Imagens de distância, intensidade e amplitude para diferentes iluminações: Iluminação Índice 0, Iluminação Índice 4, e Iluminação Índice 7. ....	81

Figura 54 – Representação da linha central de duas imagens de distância. Observa-se o afastamento devido à iluminação ambiente.....	81
Figura 55 – (a) Representação do <i>dimmer</i> , com o seu botão marcado nas posições dos índices de iluminação; (b) Iluminância de cada índice de iluminação, em W/m².	83
Figura 56 – Gráfico relacionado a iluminância e o índice de Iluminação.....	83
Figura 57 – (a) Gráfico relacionando o erro médio de distância e o índice de Iluminação; (b) gráfico relacionando o desvio padrão do erro de distância e o índice de Iluminação.....	84
Figura 58 – Para $f_{mod} = 19$ MHz: (a) Erro de distância x Intensidade ; (b) Erro de distância x Amplitude.....	85
Figura 59 – Representação de duas imagens de intensidade: (a) imagem tomada no escuro; (b) imagem tomada sob iluminação máxima: aumento nos valores de intensidade e saturação na região central.....	86
Figura 60 – Representação da imagem de amplitude, sob iluminação máxima.....	86
Figura 61 – Para $f_{mod} = 20$ MHz: (a) Erro de distância x Intensidade; (b) Erro de distância x Amplitude.....	87
Figura 62 – Para $f_{mod} = 21$ MHz: (a) Erro de distância x Intensidade; (b) Erro de distância x Amplitude.....	88
Figura 63 – Gráfico relacionando a média da distância e o TI, para cada cor.....	89
Figura 64 – Gráfico relacionando o desvio padrão da distância e o tempo de integração, para cada cor.....	90

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Compreensão do Teste de Hipótese .....	55
Quadro 2 – Principais especificações técnicas da câmera PMD CamCube 3.0 .....	57
Quadro 3 – Principais especificações técnicas do luxímetro ICEL SP-2000 .....	59

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Erros corrigidos e distâncias corrigidas, para TI = 4000 $\mu$ s .....	76
Tabela 2 - Média e desvio padrão dos erros em cada Índice de Iluminação, para as frequências de modulação 19, 20 e 21 MHz.....	79
Tabela 3 - Teste de hipótese, bilateral, ao nível de significância 5%. .....	84
Tabela 4 – Médias e Desvios Padrão das distâncias para as cores branco, cinza e preto, em função do TI .....	90
Tabela 5 – Variação do TI em cada cor: teste de hipótese, bilateral, ao nível de significância 5% (confiança de 95%).....	91
Tabela 6 – Comparação entre cores: teste de hipótese, bilateral, ao nível de significância 5% (confiança de 95%) .....	92

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AM-CW	–	Amplitude Modulate Continuous Wave
CCD	–	Charge Coupled Device
CDL	–	Curva de Distribuição Luminosa
CMOS	–	Complementary Metal Oxide Semiconductor
DC	–	Dark Current (Corrente Escura)
DFFT	–	Discret Fast Fourier Transform
EDM	–	Electro-optical Distance Meters
EQM	–	Erro Quadrático Médio
FFT	–	Fast Fourier Transform
FOV	–	Field of View (Campo de Visão)
FPN	–	Fixed Pattern Noise (Padrão de Ruído Fixo)
INMETRO	–	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
LAIG	–	Laboratório de Instrumentação Geodésica da UFPR
LED	–	Light-Emitting Diode
MED	–	Medidor Eletrônico de Distância
N	–	Ambiguidade, nº de ciclos inteiros
PMD	–	Photonic Mixed Device
ROT	–	Read-Out Time
SNR	–	Signal-to-Noise Ratio (Razão Sinal-Ruído)
TA	–	Tempo de Aquisição
TI	–	Tempo de Integração
TOF	–	Time of Flight

## SUMÁRIO

Sumário .....	9
1. INTRODUÇÃO.....	11
1.1 Hipótese .....	13
1.2 Objetivo geral .....	13
1.3 Objetivos específicos.....	13
1.4 Justificativa .....	13
2. ESTADO DA ARTE .....	14
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	18
3.1 Câmeras tof - princípios .....	18
3.1.1 Demodulação do sinal.....	20
3.1.2 Sensor CCD, sensor CMOS e sensor PMD .....	22
3.1.3 Tempo de Integração (TI).....	24
3.1.4 Modulação de Amplitude e Frequência .....	26
3.2 Conceitos de luminotécnica (FONTES).....	26
3.3 Erros – conceitos e classificação.....	27
3.3.1 Erros grosseiros .....	27
3.3.2 Erros aleatórios .....	27
3.3.3 Erros sistemáticos .....	27
3.4 Fontes de erro .....	29
3.4.1 Fontes de erro que não dependem do ambiente .....	30
3.4.2 Fontes de erro que dependem do ambiente .....	34
3.4.3 Outras fontes de erro .....	44
3.5 Ajustamento de observações .....	48
3.5.1 Método paramétrico para funções não lineares .....	49
3.6 Estatística: teste de hipótese para média de populações normais com variâncias conhecidas .....	52

4. EQUIPAMENTOS E MATERIAIS .....	56
4.1 Câmera PMD CAMCUBE 3.0 .....	56
4.2 Interferômetro laser .....	57
4.3 Alvos.....	58
4.4 Luxímetro.....	59
4.5 Lâmpada e <i>Dimmer</i> .....	60
5. METODOLOGIAS.....	61
5.1 Metodologia para o experimento 1 – distância câmera-alvo .....	61
5.1.1 Experimento 1 .....	63
5.2 Metodologia para o experimento 2 (iluminação ambiente) .....	65
5.2.1 Experimento 2 .....	67
5.3 Metodologia para o experimento 3 – refletividade do alvo .....	68
6. RESULTADOS .....	70
6.1 Resultados para o tempo de aquecimento .....	70
6.2 Resultados do experimento 1 - distância câmera-alvo .....	71
6.3 Resultados do experimento 2 - iluminação ambiente .....	81
6.4 Resultados do experimento 3 – refletividade do alvo .....	89
7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....	93
8. REFERÊNCIAS .....	97

## 1. INTRODUÇÃO

As Ciências Geodésicas vivem em constante evolução. Nas últimas décadas, invenções como a estação total, o GPS, os satélites que captam imagens, a tecnologia de varredura a *laser*, bem como o próprio desenvolvimento da computação, têm revolucionado o processo de coleta de dados da superfície terrestre, tornando-o mais rápido e econômico. Com esta evolução surgem inúmeras possibilidades de aplicação.

A tecnologia de varredura a *laser* permite coletar rapidamente milhares de pontos representativos da superfície terrestre, algo inviável se fosse tentado por outros métodos. O mesmo princípio que embasa os equipamentos de varredura a *laser*, também é aplicado nas câmeras de distância ou *range cameras*. Tais câmeras também obtêm a distância entre os alvos e o seu sensor, mas não utilizam equipamentos de varredura, e sim capturam imagens quadro a quadro. (Lichti, 2008; Foix et al., 2011; Shahbazi et al., 2011). Segundo Lichti (2008) esta é a principal vantagem da câmera de distância sobre tais equipamentos de varredura a *laser*. Além da distância, a amplitude e a intensidade do sinal de retorno refletido pela superfície também são medidos, podendo a cena ser estática ou dinâmica (Lichti, 2008). Dentre outras vantagens sobre os equipamentos tradicionais de varredura a *laser*, pode-se citar o baixo peso da câmera e o consumo reduzido de energia (Foix et al., 2011); estrutura compacta com apenas um sensor para captar a informação de distância (Foix et al., 2011; Shahbazi et al., 2011); e a alta taxa de aquisição de imagens, que possibilita o mapeamento e a localização em tempo real (Shahbazi et al., 2011). Lichti (2008) cita como desvantagens a baixa resolução e a limitação de distância livre de ambiguidades.

Com as vantagens citadas, abrem-se novas possibilidades de aplicação tais como: reconhecimento de gestos ou movimentos humanos, para maior interação homem-máquina ou uso em *video games*; reconhecimento facial, onde a informação de distância permite a modelagem da face; mobilidade de robôs, para reconhecer cenários e desviar de obstáculos ou ainda para mapeamento móvel em tempo real; sensor para reconhecimento de pedestre em via pública, para evitar atropelamentos ou colisão com automóveis; “reconstrução” do movimento executado por atletas, para melhorar a execução do movimento e obter maior rendimento, etc.

Assim como toda a tecnologia e todo o processo de medida, tais câmeras estão sujeitas a erros de ordem instrumental e ambiental de diversas fontes, que introduzem erros nas medidas. Entre as fontes de erros instrumentais – que não dependem do ambiente – estão



a temperatura do sensor, o tempo de integração, a frequência de modulação do sinal emitido, e os tipos de materiais utilizados na fabricação do sensor. Já dentre as fontes de erros que dependem do ambiente onde as imagens são tomadas, destacam-se: a relação sinal-ruído, a amplitude da reflexão dos objetos da cena, o multicaminhamento, a distorção por espalhamento interno, e a iluminação ambiente. Outras fontes que acarretam erros no cálculo das distâncias são o ângulo de incidência com que o sinal incide sobre os alvos, e a própria distância entre o alvo e a câmera.

Dentre todas estas fontes de erro, neste trabalho optou-se por analisar os erros devido à iluminação ambiente, à distância entre a câmera e o alvo, e à refletividade do alvo. Foi utilizada uma câmera PMD Camcube 3.0, capaz de obter imagens de intensidade, distância e amplitude, com 200 x 200 pixels (40.000 pixels) em um sensor CMOS (*Complementary Metal Oxide Semiconductor*) que mede a distância sensor-objeto com base no cálculo da diferença de fase entre o sinal emitido e o sinal de retorno.

## **1.1 HIPÓTESE**

É possível modelar matematicamente os erros devidos à distância câmera-alvo e à iluminação ambiente, que ocorrem no cálculo de distâncias realizado pela câmera de distância PMD Camcube 3.0, através do uso da equação da onda e de uma equação linear, respectivamente.

## **1.2 OBJETIVO GERAL**

Analisar e modelar matematicamente os erros devidos à distância câmera-alvo e à iluminação ambiente nas medidas obtidas por uma câmera de distância.

## **1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

São objetivos específicos:

- Verificar o tempo necessário para o sensor aquecer até atingir uma temperatura tal que garanta estabilidade nos valores calculados das medições, isto é, maior exatidão e/ou precisão;
- Modelar os efeitos da iluminação ambiente;
- Modelar a relação entre a distância câmera-alvo e o erro das medidas;
- Analisar o efeito da reflectância da superfície na medida de distância.

## **1.4 JUSTIFICATIVA**

As câmeras de distância são equipamentos recentes, cujas distâncias medidas são eivadas de erro devido à diversas fontes. As fontes de erros que afetam a qualidade das distâncias obtidas com as câmeras de distância vêm sendo estudadas a fim de possibilitar a obtenção de distâncias com maior exatidão e precisão, de forma que as aplicações desta tecnologia obtenham melhores resultados frente às limitações tecnológicas do equipamento.

Dentre as diversas fontes de erro que afetam as medições das câmeras de distância, tem-se os erros ocasionados pela iluminação ambiente, pela distância câmera-alvo e pela própria refletividade do alvo. O estado da arte demanda estudos sobre tais fontes de erros.

## 2. ESTADO DA ARTE

Assim como todas as observações realizadas com qualquer instrumento, as observações realizadas com as câmeras de distância possuem erros. Tais erros são originados por fatores não ambientais e fatores ambientais.

Dentre as fontes de erro não ambientais pode-se citar: (1) a temperatura do sensor (Kahlmann et al., 2006; Steiger et al., 2008; Chiabrando et al., 2009; Piatti e Rinaudo, 2012); (2) o Tempo de Integração (Kahlmann et al., 2006; Wiedemann et al., 2008; Foix et al., 2011) e; (3) os materiais de fabricação do sensor (Lange, 2000; Kahlmann et al., 2006; Lindner e Kolb, 2007; Foix et al., 2008).

Já entre as fontes de erro que dependem das características do ambiente, tem-se: (1) a relação sinal-ruído (Liu, 2002; Foix et al., 2011); (2) a refletividade dos objetos da cena (Lindner e Kolb, 2007; Falie e Buzuloiu, 2007; Foix et al., 2011); (3) o multicaminhamento percorrido pelo sinal (Dorrington et al., 2011; Fuchs, 2012); (4) o espalhamento interno do sinal de retorno dentro da câmera (Mure-Dubois e Hugli, 2007; Lindner e Kolb, 2007; Kavli, et al., 2008; Karel, 2008; Sabov e Krüger, 2008; May et al., 2009; Jamtshove Lichti, 2010; Reynolds et al., 2011; Lichti, Qi e Ahmed, 2012; Karel et al., 2012; Schäfer, Lenzen e Garbe, 2014) e; (5) a iluminação ambiente (Möller et al., 2005; Kazmi, Foix e Aleny`a, 2012; Kazmi et al., 2014).

Além das fontes de erro citadas, ainda pode-se citar o ângulo de incidência do sinal sobre o alvo (Hebert e Krotkov, 1992; Anderson et al., 2005; Kim et al., 2008) e a distância entre a câmera e o alvo (Lindner et al., 2010; Kolb et al., 2010; Foix et al., 2011).

Nesta tese buscou-se modelar os erros causados pela distância câmera-alvo, modelar os erros causados pela iluminação ambiente, e analisar os erros causados pela refletividade do alvo.

O erro ocasionado pela distância entre a câmera e o alvo é um erro sistemático que pode ser visualizado mediante um gráfico que relacione a distância medida pela câmera e a distância admitida como verdadeira, onde se observa que tende a uma curva senoidal.

Segundo Lindner et al.(2010), Kolb et al.(2010) e Foix et al.(2011), este erro ocorre devido à limitações tecnológicas e de custo, de modo que há uma incapacidade do sistema de modular perfeitamente o sinal emitido segundo um modelo matemático teórico pré-estabelecido utilizado pela câmera – geralmente senoidal.

Diversos pesquisadores procuraram minimizar este erro por meio de abordagens como: regressão linear, técnica *look-up table*, ajustamento de observações com uso de B-splines, funções polinomiais, e algoritmos de modulação/demodulação. Algumas destas pesquisas são citadas nos parágrafos seguintes.

Kuhnert e Stommel (2006), durante a calibração de uma câmera, utilizaram um modelo linear para minimizar o erro de distância, relacionando a distância real e a diferença de fase calculada, para uma janela central de 5x5 pixels. Já Lindner e Kolb (2006) utilizaram o ajustamento por mínimos quadrados com uma curva B-spline para realizar a calibração de distância, desde 3,75 m até 7,50 m. Dentre outros trabalhos onde foram utilizadas curvas B-splines pode-se citar Kahlman et al.(2006), Fuchs e Hirzinger (2008), Lindner (2010) e Lindner et al. (2010). Também ao realizar a calibração da distância, Khalmann et al.(2007) utilizaram da técnica *look-up table* (LUT) juntamente com uma matriz FPN (*fixed pattern noise*), que tem por objetivo corrigir erros devidos aos materiais utilizados na fabricação do sensor. Dentre outros autores que fizeram uso da técnica *look-up table* pode-se citar Radmer et al.(2008) e Hussman et al.(2012).

Trabalhos de Kim et al.(2008) e Schiller et al.(2008) realizaram a correção de distância utilizando funções polinomiais de 3º grau e 6º grau, respectivamente. Lindner et al.(2008) corrigiram os erros de distância através de um algoritmo de demodulação e da consequente amostragem de uma função de correlação. Consideraram que o sinal emitido é retangular, baseado-se no fato de que, por limitações tecnológicas e de custo, não é viável emitir um sinal perfeitamente senoidal. Já Hussmann e Knoll (2013) desenvolveram um equipamento de iluminação que modula uma onda retangular emitida pela câmera de distância em uma onda senoidal. Posteriormente Hussmann et al. (2014) desenvolveram um modelo que considera a distribuição de ruídos na imagens de distância, visando atenuar o erro de distância.

Nesta tese a correção dos erros de distância foi realizada utilizando dois modelos físicos baseados na equação da onda, considerando que a amplitude é atenuada ao longo da distância seguindo um comportamento linear ou exponencial de base e. Para ajustar as observações aos modelos propostos, fez-se o ajustamento pelo método paramétrico.

Quanto aos erros devidos à iluminação ambiente, tem-se estudos de Möller et al.(2005), Kahlmann (2007), May et al.(2007), Kazmi, Foix e Aleny`a (2012) e Kazmi et al.(2014).

Segundo Möller et al.(2005), se a iluminação ambiente for mais intensa que a iluminação ativa da câmera, dois problemas podem ocorrer: (1) ruídos na imagem, ocasionando erros nas medidas das distâncias, uma vez que a relação sinal/ruído (SNR - *Signal to Noise Ratio*)

apresentará menor valor e; (2) saturação do pixel, quando a energia captada é excessiva, impossibilitando o cálculo da distância.

Para aumentar o valor da relação sinal/ruído algumas medidas podem ser tomadas, tais como: (a) ajustar o tempo de integração para evitar a sub-iluminação ou a saturação do pixel; (b) aumentar a quantidade de emissores de energia – LEDs (*Light-Emitting Diodes*) ou aumentar a sua potência (Kahlmann, 2007); (c) utilizar filtros espectrais (passa banda) para limitar a captação da energia eletromagnética a uma faixa mais estreita do espectro (Möller et al., 2005); (d) utilizar o chamado “modo *burst*”, isto é, aumentar a potência do sinal emitido em um curto espaço de tempo (May et al., 2007).

Já Kazmi, Foix e Aleny`a (2012) e Kazmi et al.(2014) realizaram estudos sobre a influência da iluminação oriunda da luz solar, à sombra e em ambiente fechado, sobre folhas de vegetação, buscando encontrar o melhor tempo de integração para cada situação.

Nos estudos citados, os pesquisadores buscaram minimizar os efeitos da iluminação ambiente sobre as medições através do aumento do valor da relação sinal/ruído. Já para a pesquisa mostrada nesta tese, procurou-se verificar a influência da variação da iluminação sobre os valores de distância, amplitude e intensidade calculados pela câmera, procurando inter-relacionar estes valores e modelá-los.

A respeito dos trabalhos sobre a refletividade dos alvos, pode-se citar trabalhos de Lindner e Kolb (2007), Falie e Buzuloiu (2007), Guomundsson et al. (2007), Weyer et al. (2008), Radmer et al. (2008).

Lindner e Kolb (2007) desenvolveram um modelo de correção baseado em B-splines cúbicas parametrizadas, em função da refletividade do alvo e da distância câmera-alvo. Informam que a distância obtida pela câmera diminui com a menor refletividade dos objetos.

Já Falie e Buzuloiu (2007) utilizaram um modelo para prever o ruído em função da distância e da amplitude de cada pixel, utilizando o método de Monte Carlo de inferência estatística, assumindo a distribuição normal, para validação. Não explicam a influência na refletividade devido a objetos no entorno do alvo analisado.

Guomundsson et al.(2007) propuseram corrigir os efeitos da refletividade por um fator padronizado, o inverso da amplitude. Weyer et al. (2008) procuraram estabelecer um limiar de amplitude do sinal de retorno para vários tempos de integração, sendo que tal abordagem descarta grande parte da imagem. Informaram que as características refletivas do alvo influenciam na precisão da medida obtida com câmeras de distância e que, para um alvo maior escuro, se observou uma menor precisão nos bordos da imagem. Radmer et al. (2008) fizeram uso da técnica *look-up table*, isto é, uma matriz de valores de correção.

Nesta tese quantificou-se os erros causados pela refletividade do alvo, buscando verificar, estatisticamente, a significância das alterações ocorridas nos valores de distância, conforme mudava-se o tempo de integração utilizado ou a refletividade do alvo.

### 3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção são apresentados os principais conceitos e princípios utilizados neste estudo. Eles incluem os princípios de funcionamento da câmara de distância TOF, conceitos de luminotécnica e os erros presentes no sistema TOF.

#### 3.1 CÂMERAS TOF - PRINCÍPIOS

As câmeras de distância utilizam o princípio *Time-of-Flight* (TOF), que podem realizar medições de duas formas (Baltsavias, 1999; Foix et al., 2011; Piatti, 2011):

- a) através de pulsos curtos de energia (medição direta): onde a distância é calculada diretamente, com base no tempo decorrido entre a emissão e o retorno do pulso.
- b) através de uma onda contínua (medição indireta): onde a distância é calculada indiretamente, com base na diferença de fase entre um sinal modulado emitido e o sinal demodulado de retorno.

Câmeras que utilizam ondas contínuas possuem sensores com os chamados "*lock-in pixel*", isto é, pixels capazes de realizar a demodulação de um sinal que incide sobre o sensor e, por meio do princípio *time-of-flight*, utilizam os parâmetros obtidos com a demodulação – amplitude e fase – para calcular a distância para cada pixel da imagem (Büttgen et al., 2005). A modulação consiste na alteração da frequência, da amplitude ou da fase – ou uma combinação destes – de uma onda eletromagnética (Tome, 2010), para transmitir um sinal em uma onda portadora. Já a demodulação (ou detecção) consiste no processo inverso, isto é, detectar a onda portadora, extrair os parâmetros do sinal e reconstituí-lo.

Na Figura 1 são mostradas duas formas de representação da diferença de fase para duas ondas senoidais representando o sinal emitido  $g(t)$ , em linha cheia, e o sinal recebido ou de retorno  $s(t)$ , em linha pontilhada. A amplitude do sinal de retorno tende a ser menor que a do sinal emitido, uma vez que apenas parte do sinal retorna ao sensor. Isto ocorre porque ao incidir sobre um objeto, dependendo das características da superfície e da geometria da observação, o sinal incidente pode ser absorvido ou refletido. Como a reflexão pode ocorrer em diferentes direções, apenas parte dele retorna ao sensor. Ainda na Figura 1, é mostrada a diferença de fase ( $\varphi$ ) entre os sinais, a amplitude ( $A$ ) do sinal de retorno, e o comprimento de onda ( $\lambda$ ).

De acordo com Lichti (2008) e Lindner e Kolb (2006), sendo  $g(t)$  o sinal emitido – modulado em amplitude e frequência – pelas fontes de iluminação da câmera (Equação 1), e  $s(t)$  o sinal de retorno – refletido pela superfície dos objetos – que incide sobre o sensor (Equação 2), as distâncias para cada pixel são calculadas com base em uma função de correlação cruzada entre estes dois sinais. A correlação cruzada, representada na Equação 3, é utilizada para verificar a similaridade entre dois sinais  $g(t)$  e  $s(t)$ , em função de um atraso entre o sinal emitido e o sinal de retorno. Este atraso é a diferença de fase entre os sinais.

$$g(t) = A \cdot \cos(\omega \cdot t) \quad (1)$$

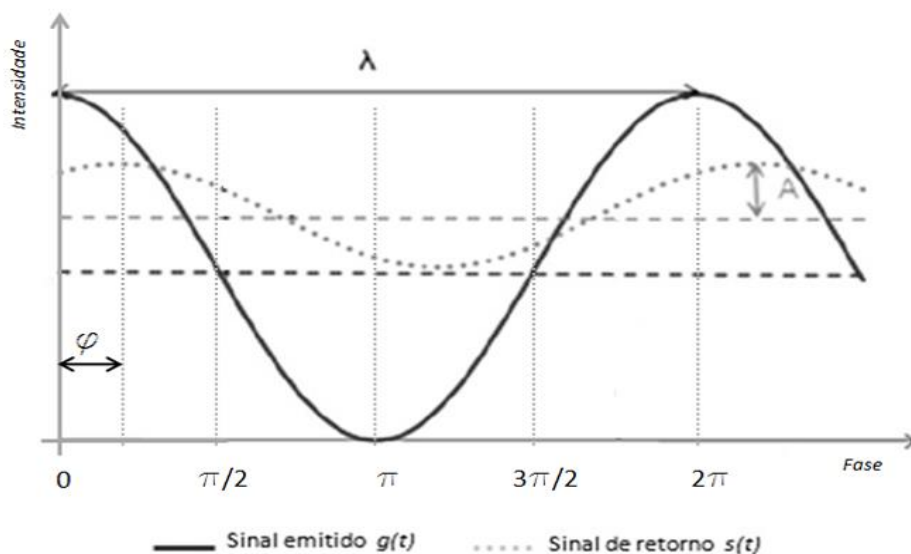
$$s(t) = k + A \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi) \quad (2)$$

$$c(\tau) = (s \star g)(\tau) = h \cdot \frac{A}{2} \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi) \quad (3)$$

sendo:  $g(t)$  = função do sinal modulado emitido;  $s(t)$  = função do sinal de retorno;  $\star$  = operador de correlação cruzada;  $k$  = fator referente à iluminação ambiente;  $\omega$  = freq. ang. de modulação do sinal emitido  $g(t)$ ;  $\varphi$  = diferença de fase entre o sinal emitido  $g(t)$  e o sinal de retorno  $s(t)$ ;  $t$  = tempo.

Figura 1 – Representação da diferença de fase ( $\varphi$ )

Fonte: Adaptado de Piatti (2011) e Scherer (2009)





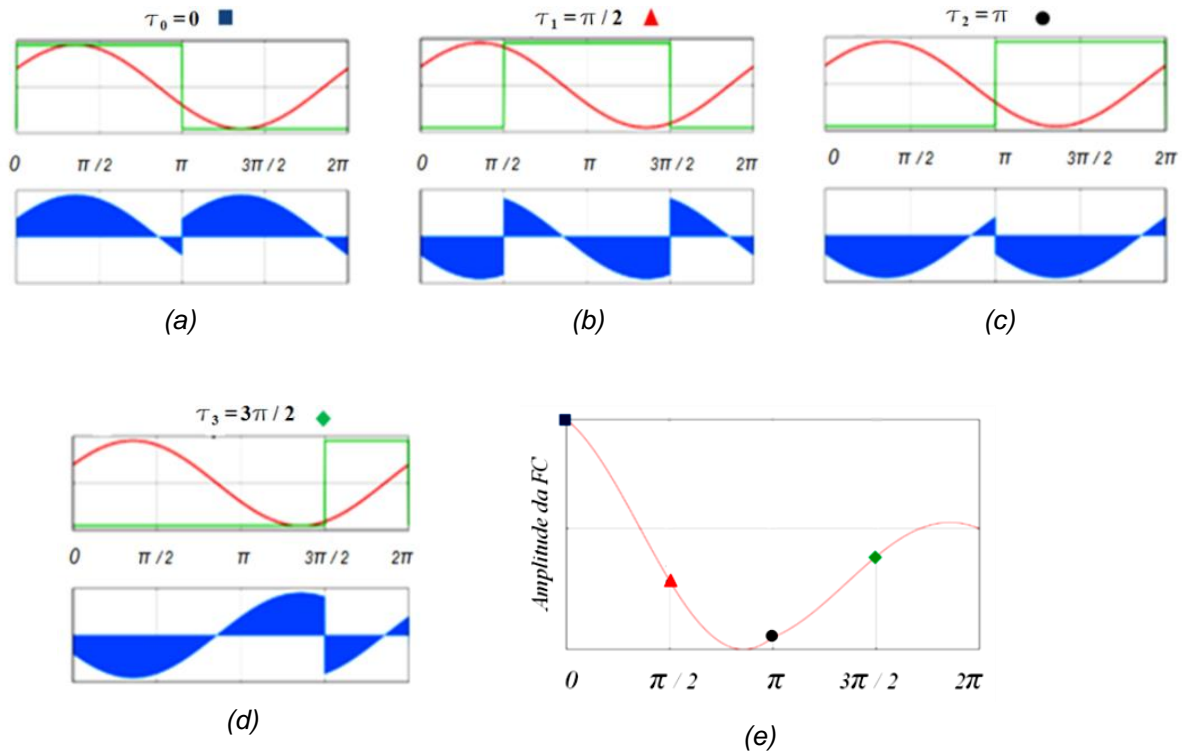
### 3.1.1 Demodulação do sinal

Para o cálculo da diferença de fase é feita a demodulação do sinal, através da discretização da função de correlação em quatro amostras –  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$  e  $a_4$  – em instantes ( $\tau$ ) defasados de  $\pi/2$  ao longo do tempo, permitindo que o sinal seja reconstruído sem ambigüidades (Büttgen et al., 2005).

Três amostras já são suficientes para a demodulação do sinal, entretanto são tomadas quatro amostras, o que garante maior precisão no cálculo da amplitude, da diferença de fase e da constante devido à corrente escura. Quanto maior o número de amostras, maior a precisão no cálculo dos parâmetros. A Figura 2 mostra a correlação entre o sinal emitido – representado na cor verde e teoricamente assumindo ser uma onda quadrada – e o sinal de retorno – representado na cor vermelho, em forma senoidal (Rapp, 2007).

Figura 2 – Representação das amostras ( $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$  e  $a_4$ ) da correlação cruzada entre o sinal emitido (quadrado) e o sinal de retorno (senoidal) para os instantes: (a)  $\tau_0 = 0$  rad, (b)  $\tau_1 = \pi / 2$  rad, (c)  $\tau_2 = \pi$  rad e (d)  $\tau_3 = 3\pi / 2$  rad ; (e) curva representativa da função da correlação cruzada.

Fonte: Adaptado de Rapp (2007)



A diferença de fase ( $\varphi$ ) é calculada pela Equação 4, a seguir:

$$\varphi = \arctan\left(\frac{a_2 - a_4}{a_1 - a_3}\right) \quad (4)$$

Com o valor da diferença de fase é possível calcular a distância (D), pela Equação 5 (Khalman et al., 2006),

$$D = \frac{c \cdot \varphi}{4 \cdot \pi \cdot f_m} + N \cdot \lambda \quad (5)$$

onde:  $c$  = velocidade da luz no vácuo (constante) = 299.792.458 m/s e;

$f_m$  = frequência de modulação do sinal emitido;

$N$  = número de ciclos inteiros (ambiguidade);

$\lambda$  = comprimento de onda.

O termo  $N$  representa os ciclos inteiros (ambiguidade) do sinal – comprimento de onda ( $\lambda$ ) completo – e a primeira parte da equação a parte fracionada. Como não é possível determinar a ambiguidade, este termo é então desprezado, o que limita o alcance das medições do sensor. Assim, o cálculo da distância é feito por meio da Equação 6, abaixo.

$$D = \frac{c \cdot \varphi}{4 \cdot \pi \cdot f_m} \quad (6)$$

Outras grandezas que podem ser derivadas são a Intensidade (I) e a Amplitude (A), calculadas pelas Equações 7 e 8, respectivamente.

$$I = \frac{a_1 + a_2 + a_3 + a_4}{4} \quad (7)$$

$$A = \frac{\sqrt{(a_1 - a_3)^2 + (a_2 - a_4)^2}}{2} \quad (8)$$

Os valores de distância, intensidade e amplitude são armazenados no sensor – CCD ou CMOS – da câmera.

### 3.1.2 Sensor CCD, sensor CMOS e sensor PMD

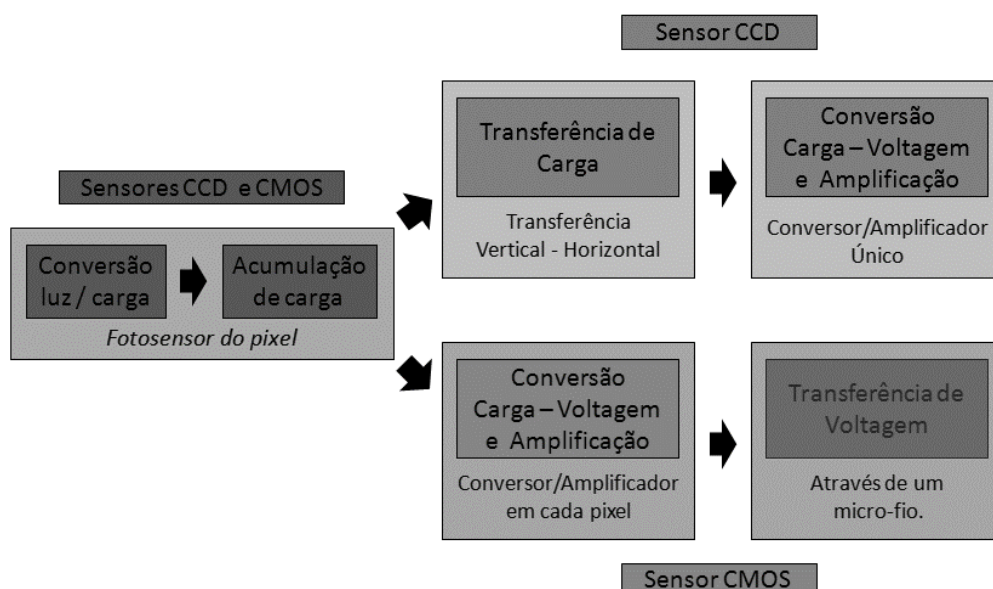
As câmeras digitais fazem uso de sensores para registrar a energia eletromagnética. Tais sensores utilizam tecnologia CCD (*Charge Coupled Device*) ou CMOS (*Complementary Metal Oxide Semiconductor*) para detectar e armazenar esta energia em arranjos de fotodetectores (pixels). Ambos os tipos de sensores apresentam vantagens e desvantagens.

Em um sensor CCD os fótons que incidem sobre sua superfície são armazenados como uma carga elétrica. A carga é transportada até um único conversor/amplificador, que a converte em um sinal elétrico, uma voltagem. Por ter um único conversor/amplificador que realiza a conversão da carga em sinal elétrico, o sensor CCD gera uma imagem com menos ruídos do que as geradas em um sensor CMOS (Lange, 2000).

Já em um sensor CMOS cada pixel tem o seu próprio conversor/amplificador e, desta forma, está mais propenso a ruídos que se devem às diferenças de materiais que podem existir entre um pixel e outro, bem como depende de uma homogeneidade de eficiência destes conversores. A Figura 3 apresenta uma ilustração com as diferenças de funcionamento entre os sensores.

Figura 3 – Ilustração do funcionamento do sensor CCD e do sensor CMOS.

Fonte: Adaptado de Sony Corporation (2008)



O fenômeno chamado Corrente Escura (*Dark Current* - DC) afeta ambos os tipos de sensores. Este fenômeno pode ser definido como a geração de cargas não desejadas que

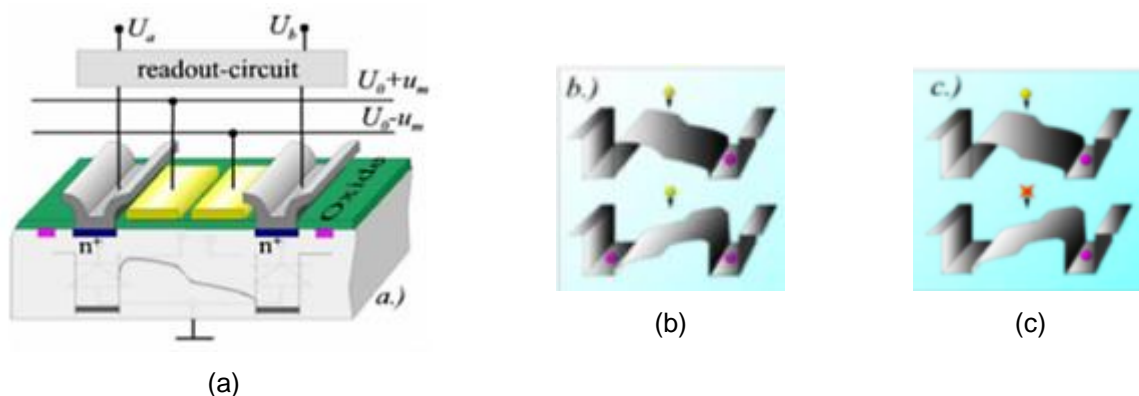
se acumulam nos pixels do sensor devido a processos térmicos naturais que ocorrem enquanto o sensor opera sob qualquer temperatura acima do zero absoluto, isto é, 0 K ou - 273,15°C. Estas cargas indesejadas geram ruídos na imagem. Os valores destas cargas variam espacialmente sobre o sensor, produzindo um padrão de ruído fixo (*Fixed Pattern Noise* - FPN) devido à corrente escura (Taylor, 1998). Os sensores CMOS são mais propensos à geração da corrente escura, gerando imagens de pior qualidade – com mais ruídos – quando comparado ao sensor CCD. Entretanto os sensores CMOS possuem a vantagem de ser produzido com menor custo, além de consumir menos energia

O sensor PMD (*Photonic Mixer Device*) utiliza a tecnologia CMOS com dois elementos fotodetectores e dois diodos que captam as cargas elétricas recebidas do sinal óptico modulado recebido e as transformam em informação de distância (Oliveira, 2011). É devido a este processo misto que os elementos do sensor PMD são chamados "*smart pixels*" (Möller, 2005).

A Figura 4 mostra o funcionamento de um sensor PMD. Na Figura 4a, na parte central, observa-se dois fotodetectores representados em amarelo e, nas extremidades, os diodos representados como canaletas de cor cinza.

Figura 4 – Funcionamento de um sensor PMD

Fonte: Möller et al. (2005)



A luz penetra através dos fotodetectores e a carga é direcionada pelos diodos, para a direita e/ou para a esquerda. A Figura 4b mostra o caso quando parte da carga é direcionada para a direita e parte da carga é direcionada para a esquerda. Neste caso esta diferença de potencial (voltagem) é proporcional à diferença de fase entre o sinal emitido e o sinal de retorno, que por sua vez foi proporcional à distância calculada. Já na Figura 4c toda a carga

é direcionada para a esquerda ou toda para a direita, logo não há diferença de fase e a distância calculada foi nula (Möller, 2005).

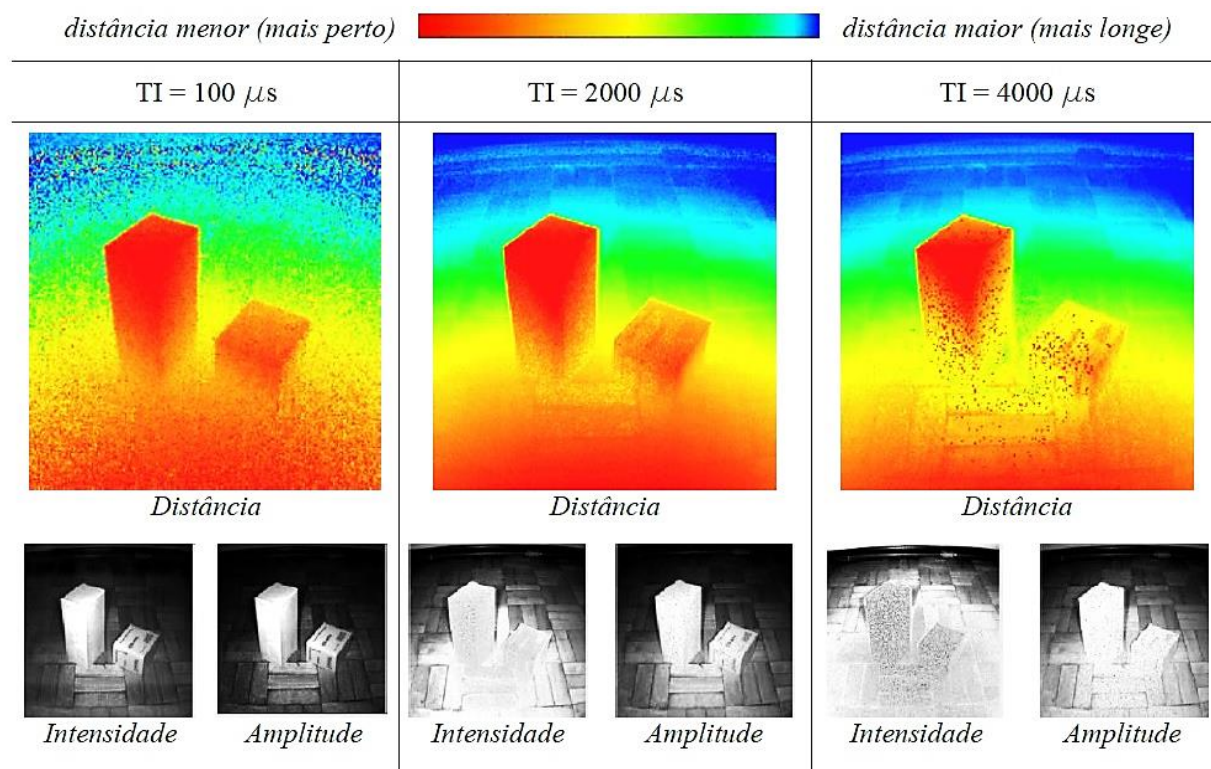
### 3.1.3 Tempo de Integração (TI)

O Tempo de Integração (TI) consiste no intervalo de tempo disponível para o sensor captar a luz incidente no sensor, sendo similar à velocidade do obturador das câmeras analógicas. No decorrer deste tempo é realizada a integração da função de correlação e quanto maior este tempo, maior será a região abrangida pela integração.

A mudança do tempo de integração da câmara afeta os valores de distância em todos os pixels da imagem (Foix et al., 2011). A Figura 5 mostra imagens de distância, intensidade e amplitude de duas caixas de papelão sobre um piso de madeira. Percebe-se a ocorrência de ruídos nas imagens de distância, intensidade e amplitude, devido à alteração do tempo de integração.

Figura 5 – Imagens de distância, intensidade e amplitude para TI 100, 2000 e 4000  $\mu$ s.

Fonte: o autor.



Na Figura 5 a escala hipsométrica indica desde a cor azul, mais distante, até a cor vermelha, mais próximo. Observa-se que para o tempo de integração de 100 microssegundos a imagem de distância apresenta muito ruído, pois o tempo de captação do sinal foi muito baixo. Já para o tempo de integração de 4000 microssegundos ocorre o contrário, com um excesso de captação do sinal, havendo saturação na região central da imagem, gerando ruídos. O tempo de integração de 2000 microssegundos se mostra mais adequado para a cena.

Ambas as imagens, de intensidade e de amplitude, são diretamente proporcionais ao tempo de integração, mas as imagens de intensidade se mostram mais sensíveis a este aumento. Tal verificação é explicada pelas Equações 7 e 8, de amplitude e intensidade, respectivamente, onde a amplitude é calculada se utilizando de diminuições de valores da função de correlação de instantes distintos, havendo uma normalização dos valores. O mesmo não ocorre no cálculo da intensidade.

Os ruídos nas imagens costumam ser mensurados pela relação sinal/ruído – que na literatura estrangeira é chamada *signal-to-noise ratio*, abreviado por SNR – e é matematicamente definida pela Equação 9. Observa-se que o valor de SNR é inversamente proporcional à amplitude dos ruídos no retorno do sinal.

$$SNR = \frac{A_{sinal\ retorno}}{A_{ruído}} \quad (9)$$

Já a Equação 10 mostra que o valor da razão sinal/ruído é proporcional a amplitude (A) do sinal de retorno e inversamente proporcional à intensidade (B) do sinal de retorno (Kazmi et al., 2014) – sendo mais adequada para câmeras de distância. Uma forma de aumentar o valor da razão sinal/ruído é diminuindo o valor do TI, o que diminui o efeito da iluminação ambiente.

$$SNR = \frac{\sqrt{2} \cdot A}{\sqrt{B}} \quad (10)$$

Entretanto, tal diminuição do valor do TI, também causa uma diminuição no valor da amplitude – diminuindo a SNR – de maneira que há um dilema sobre a simples alteração do valor do TI como forma de melhorar a precisão das medidas. Diante disso Kazmi et al. (2014)

afirmam que o tempo de integração ideal é aquele que melhor relaciona a amplitude e a intensidade, obtendo a maior exatidão e precisão nas medidas.

### 3.1.4 Modulação de Amplitude e Frequência

As câmeras de distância com princípio TOF são equipamentos do tipo AM-CW (*amplitude-modulated continuous-wave*), isto é, equipamentos que geram ondas contínuas de amplitude modulada. Assim, a emissão da onda do sinal se faz com amplitude definida, assim como a sua frequência, para os objetivos a que se propõem.

A câmera PMD CamCube 3.0, utilizada neste estudo, possui tais características, modulando a amplitude e a frequência do sinal emitido. Entretanto, a amplitude da onda é modulada em um padrão fixo da câmera, não podendo ser alterada; já a frequência pode ser escolhida dentre as opções com os seguintes valores fixos: 18 MHz, 19 MHz, 20 MHz e 21 MHz.

## 3.2 CONCEITOS DE LUMINOTÉCNICA

A Luminotécnica é o estudo da aplicação da iluminação artificial em ambientes internos e externos. Visando a modelagem dos efeitos da iluminação externa artificial no cálculo de distâncias, a seguir são explicados alguns conceitos de luminotécnica (Osram, 2013).

**Fluxo luminoso ( $\Phi$ )** - É a quantidade de luz emitida por uma fonte, medida em lumens (lm), na tensão nominal de funcionamento, entre os limites de comprimento de onda de luz visível (380 e 780 nm).

**Intensidade luminosa (I)** - É o fluxo luminoso irradiado em uma determinada direção. É medida em candelas (cd).

**Nível de Iluminância (E)** - É o fluxo luminoso que incide sobre determinada área de uma superfície situada a certa distância desta fonte. É expressa em lux (lx), sendo que para um comprimento de onda de 555 nm, tem-se que 1 W/m<sup>2</sup> é igual a 683 lux, ou 683 lumens/m<sup>2</sup>.

### **3.3 ERROS – CONCEITOS E CLASSIFICAÇÃO**

Erro é a diferença entre o valor medido e o valor verdadeiro de uma grandeza. O valor verdadeiro de uma grandeza é um conceito idealizado, uma vez que só poderia, em princípio, ser obtido com infinitas medições (Inmetro, 2008). Desta forma, entende-se que o erro, sendo dependente do valor verdadeiro, também é um conceito idealizado. Os erros são classificados em três tipos (Gemael, 1994): erros grosseiros, erros sistemáticos e erros aleatórios.

#### **3.3.1 Erros Grosseiros**

Erros grosseiros são erros que ocorrem devido à imperícia ou descuidos do usuário que realiza a medição, bem como devido a alguma falha momentânea no aparelho utilizado. Uma medida com erro grosseiro se destaca das demais medidas da mesma grandeza, uma vez que tem valor distante da média aritmética das demais medidas. Observações com erros grosseiros devem ser descartadas da amostra.

#### **3.3.2 Erros Aleatórios**

É a parcela imprevisível do erro, sendo originado por variáveis desconhecidas ou variáveis que não puderam ser modeladas. Assim, não podem ser compensados, mas geralmente podem ser minimizados pelo aumento do número de observações (Inmetro, 2008). Estão ligados à precisão das medições, isto é, à dispersão (variância) dos valores medidos em torno do valor verdadeiro, assumindo um valor médio como verdadeiro.

#### **3.3.3 Erros Sistemáticos**

É a parcela previsível do erro, ocorrendo sistematicamente do mesmo modo quando as medições são feitas nas mesmas condições. São causados por variáveis conhecidas e podem ser modelados segundo alguma função matemática, em situações como: má calibração do instrumento utilizado, problema de visão do usuário, condições inadequadas externas ou internas (temperatura do ambiente ou do aparelho, umidade do ambiente, etc.).



O erro sistemático está associado à exatidão das medições, e tende a afastar o valor medido do valor verdadeiro da grandeza desejada. Conhecendo o erro sistemático, é possível reposicionar as medidas em torno do valor verdadeiro da grandeza, ficando sujeitas apenas aos erros aleatórios. Podem ser evitados através de técnicas especiais de observação ou eliminadas, *à posteriori*, mediante uso fórmulas fornecidas pela teoria (Gemael, 1994).

Segundo Landgate (2009), nos equipamentos de medição eletrônica de distância (princípio EDM, *Electro-optical Distance Meters*) distinguem-se três tipos de erros sistemáticos instrumentais: erro de zero, erro de escala, e erro cíclico. Erros sistemáticos ocorrem em estações de medição com princípio EDM, bem como em câmaras de distância (Lichti, 2008; Lindner e Kolb, 2006).

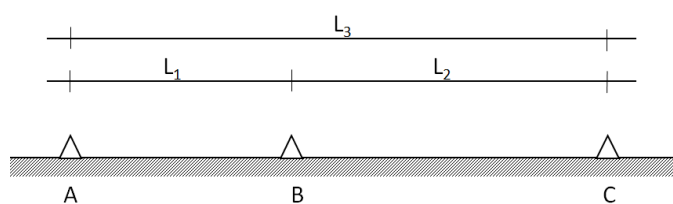
### 3.3.3.1 Erro de Zero

É a diferença entre o centro geométrico do instrumento – materializado pela interseção dos eixos vertical, horizontal, e eixo de colimação – e o centro eletrônico do instrumento (Faggion, 2001). O centro eletrônico é o ponto de onde parte o sinal que medirá a distância. Este erro também é chamado de constante aditiva, pois seu valor deve ser somado às distâncias medidas.

Para determinar o valor do erro de zero ( $Z_0$ ), deve-se medir três distâncias –  $L_1$ ,  $L_2$  e  $L_3$  – com o instrumento eletrônico desejado, obtendo as distâncias  $d_1$ ,  $d_2$  e  $d_3$  (ver Figura 6).

Figura 6 – Distâncias para determinação do valor do Erro de Zero.

Fonte: Adaptado de Gripp (1986).



Com base nestas três medidas e utilizando as Equações 11 e 12, determina-se o valor de  $Z_0$  (Faggion, 2001).

$$(d_3 + Z_0) = (d_1 + Z_0) + (d_2 + Z_0) \quad (11)$$

$$Z_0 = d_3 - d_1 - d_2 \quad (12)$$

### 3.3.3.2 Erro de Escala

Este erro ocorre quando a frequência modulada no momento da emissão do sinal não corresponde exatamente à frequência projetada para o aparelho (MAIA, 1999). Esta alteração no valor da frequência é corrigida por meio da Equação 13, sendo que as distâncias são corrigidas pela Equação 14 (FAGGION, 2001).

$$C = \frac{f_n - f_m}{f_m} \quad (13)$$

$$d_c = d_m + C \cdot d_m \quad (14)$$

onde C = correção (em ppm);  $d_c$  = distância corrigida;  $d_m$  = distância medida;  $f_n$  = frequência nominal do instrumento; e  $f_m$  = frequência medida.

### 3.3.3.3 Erro Cíclico

O Erro Cíclico ocorre no processo de medição interna da diferença de fase, devido à diferença de superposição entre o sinal emitido e o sinal de retorno (Surveyor - General Victoria, 2012). Também pode ocorrer em câmaras de distância, como atestam Lichti (2008) e Lindner e Kolb (2006). Entre as propostas para modelagem deste erro, têm-se as que fazem uso de *splines* (Lindner e Kolb, 2006).

## 3.4 FONTES DE ERRO

O cálculo de distâncias nas câmeras de distância é influenciado por erros que podem ser divididos em:

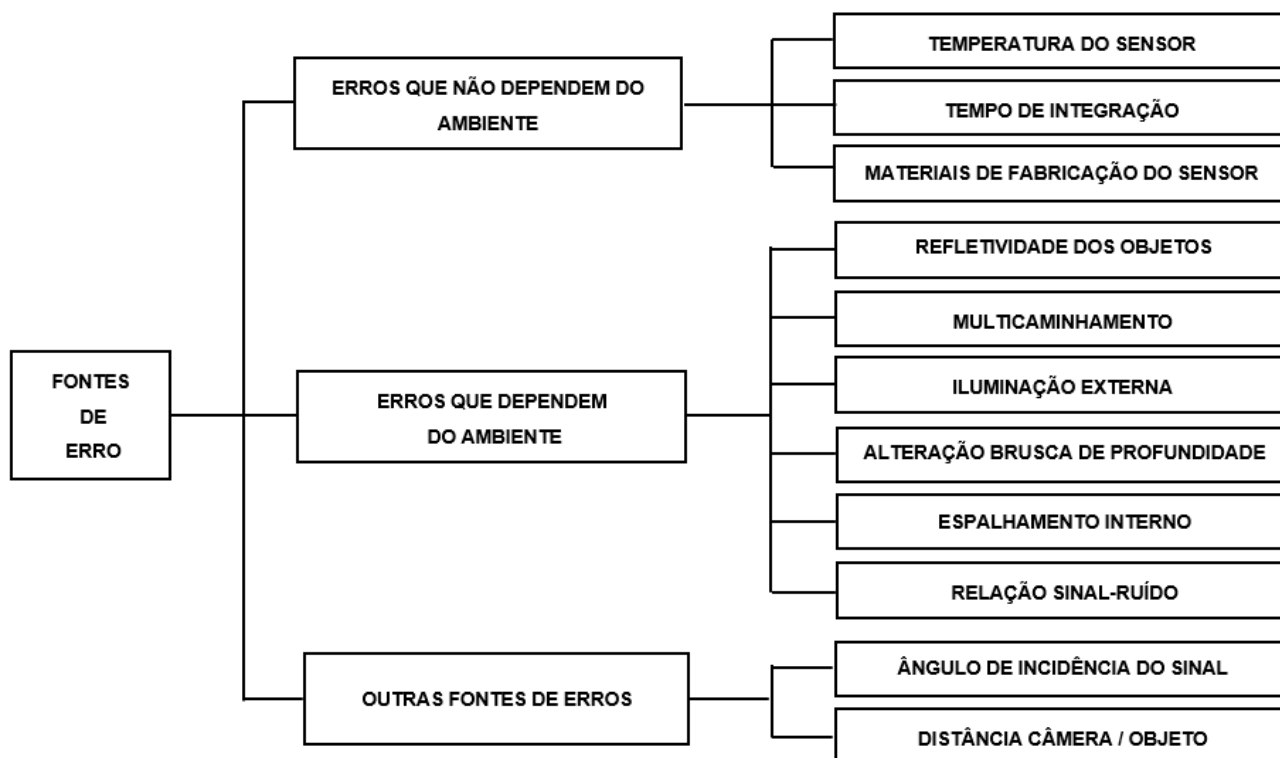
a) erros que não dependem das características da cena ou ambiente onde as imagens estão sendo coletadas, e;

b) erros que dependem das características da cena ou ambiente onde as imagens estão sendo tomadas.

A Figura 7 mostra as diversas fontes de erro.

Figura 7 – Fontes de erro em câmeras de distância

Fonte: o Autor.



### 3.4.1 Fontes de erro que não dependem do ambiente

Alguns erros que ocorrem no cálculo das distâncias são erros que não dependem do ambiente, isto é, são erros que não são influenciados por características do ambiente, sendo este controlado ou não. São os erros instrumentais. Tais erros se originam por diversas fontes como: a temperatura do sensor, o tempo de integração, a frequência de modulação, as distorções de lentes, os materiais utilizados na fabricação do sensor. Cada uma destas fontes de erro é explicada nos itens a seguir.

### 3.4.1.1 Temperatura do sensor

Sensores CCD ou CMOS são sensíveis à variação de temperatura, de modo que a amplitude registrada pelo sensor e consequentemente as distâncias calculadas para cada pixel se alteram de acordo com a faixa de temperaturas em que o sensor está operando. Experimentos de Kahlmann et al. (2008), Steiger et al. (2008), Chiabrando et al. (2009), e Piatti e Rinaudo (2012), mostram que para baixas temperaturas há uma maior modificação nos valores das distâncias calculadas. Para minimizar este erro e garantir maior exatidão, deve-se aguardar um intervalo de tempo (*“warm-up time”*) para que o sensor atinja uma determinada temperatura – que varia de acordo com a câmera/sensor utilizado – para que as medidas calculadas se aproximem ao máximo do valor real (admitido).

Segundo estudos de Kahlmann et al. (2006) com a câmera SwissRanger™ SR-2, depois de passados 04 (quatro) minutos com a câmera ligada, as medições realizadas com a câmera estabilizam, isto é, apresentaram valores com baixa variância. Steiger et al. (2008), utilizando a câmera SwissRanger SR-3000, também obteve valores estáveis após pouco mais de 4 minutos (250 segundos) de espera. Já Chiabrando et al. (2009), utilizando uma câmera SwissRanger SR-4000, realizaram experimentos onde foram necessários 40 (quarenta) minutos para estabilizar os valores das medições. Piatti e Rinaudo (2012), utilizando a câmera PMD Camcube 3.0, informam que é suficiente aguardar 40 (quarenta) minutos com a câmera ligada para atingir estabilidade nas medições.

### 3.4.1.2 Tempo de integração

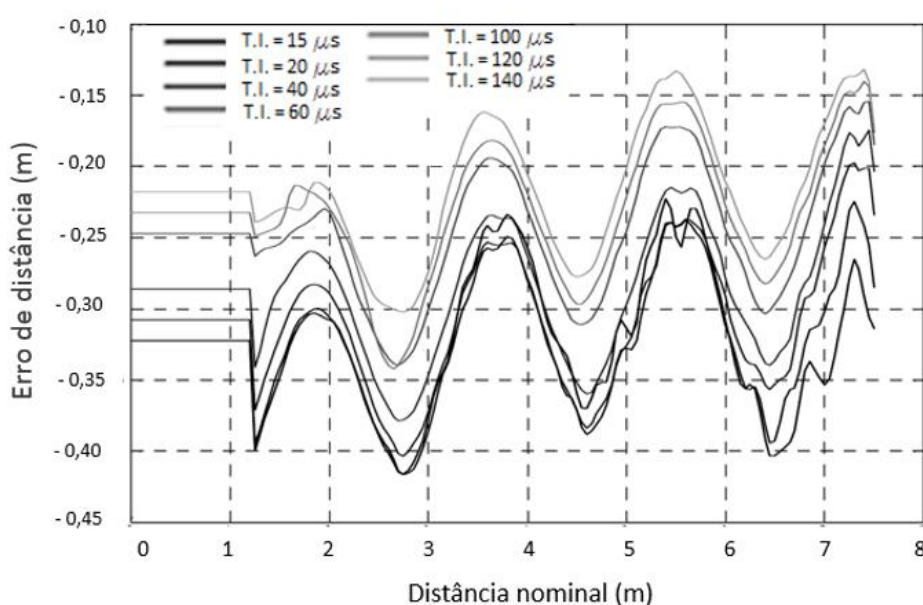
Os valores das distâncias calculadas em toda a imagem dependem do tempo de integração utilizado. Em uma mesma cena, tempos de integração diferentes geram diferentes valores de distância em toda a imagem, pois altera o intervalo de distância para o qual a câmera é mais sensível (Foix et al., 2011). O tempo de integração é o parâmetro interno mais crítico das câmeras de distância, pois ele regula o intervalo de tempo para o qual os fótons serão detectados, para então calcular o desvio de fase e a respectiva distância (Wiedemann et al., 2008).

Kahlmann et al. (2006) realizaram experimentos que quanto maior o valor do tempo de integração, maior o valor da distância medida. Entretanto, para tempos de integração muito altos, pode ocorrer saturação dos pixels no sensor, o que também acarreta erros. Na Figura

8 é possível perceber esta relação entre o tempo de integração, a temperatura externa (ou ambiente) e a distância calculada pela câmera.

Figura 8 – Relação entre o erro de distância e a distância nominal, para vários tempos de integração.

Fonte: Kahlmann et al. (2006).



### 3.4.1.3 Materiais utilizados na fabricação do sensor

Um sensor CMOS tende a apresentar imagens com maior ruído pois, como cada pixel tem seu próprio conversor, há a possibilidade destas conversões não serem realizadas com a mesma exatidão e/ou precisão devido à pequenas diferenças em cada pixel, inclusive no material utilizado para sua fabricação. É difícil garantir que cada pixel tenha sido fabricado exatamente com a mesma quantidade, bem como com exatamente as mesmas propriedades.

Segundo Foix et al. (2008), erros relativos ao material utilizado na fabricação de sensores CMOS ("*clock skew error*") ocorrem por dois motivos:

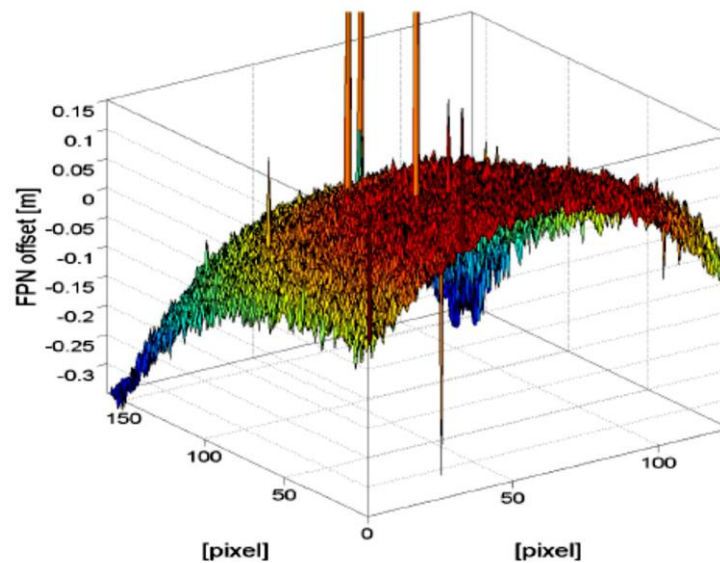
- (a) Diferentes propriedades dos materiais utilizados na fabricação do sensor CMOS: fazem com que dois pixels vizinhos registrem distâncias diferentes, sendo que na realidade corresponderiam a uma mesma distância real.

- (b) Erro latente: devido ao tempo de atraso ao carregar o capacitor durante o processo de correlação entre o sinal emitido e o de retorno, causando uma rotação no plano da imagem, isto é, com uma orientação errada.

Tais erros causam um efeito conhecido como *Fixed Pattern Noise* (Ruído de Padrão Fixo), abreviado por FPN, fazendo com que cada pixel apresente um erro individual e constante (Lange, 2000; Lindner e Kolb, 2007), isto é, cada pixel irá sempre acrescentar ou subtrair um valor na carga captada. Sendo relacionado a cada pixel, este erro está ligado à posição do pixel no sensor, sendo comumente representados por uma matriz FPN, conforme pode ser visto na Figura 9. Ressalta-se que, para cada tempo de integração utilizado, haverá uma respectiva matriz FPN (Kahlmann et al., 2006).

Figura 9 – Matriz FPN para um determinado tempo de integração.

Fonte: Kahlmann et al. (2006)



Para um ponto  $x$ , este erro pode ser aproximado pelos coeficientes  $b_0$  e  $b_1$  na Equação 13 a seguir (Fuchs e Hirzinger, 2008):

$$E(x) = b_0 \cdot r + b_1 \cdot c, \quad (13)$$

sendo  $r$  e  $c$  a linha e a coluna, respectivamente, do pixel no sensor.

### **3.4.2 Fontes de erro que dependem do ambiente**

Características do ambiente em que a câmera está sendo utilizada influencia na qualidade das imagens de distância obtidas. Os principais fatores que influenciam na qualidade das imagens de distância, são explicados nos itens a seguir.

#### **3.4.2.1 Relação Sinal / Ruído**

A relação entre a amplitude do sinal de retorno e a amplitude do ruído é conhecida como relação sinal-ruído ou razão sinal-ruído. Valores baixos para SNR ocorrem em cenas em que a iluminação não é uniforme, sendo que áreas menos iluminadas são mais susceptíveis a ruídos do que áreas mais iluminadas.

É um erro não sistemático, altamente dependente da amplitude, do tempo de integração e da uniformidade das profundidades da cena (Foix et al., 2011). Os sensores CMOS são mais susceptíveis a ruídos do que os sensores CCD, apresentando valores de SNR maiores que dos sensores CCD (Liu, 2002).

#### **3.4.2.2 Propriedades reflexivas dos objetos**

A exatidão da medida é proporcional à amplitude da reflexão. Porém, tanto uma reflexão insuficiente quanto uma reflexão excessiva – que podem causar a saturação do pixel – geram erros no cálculo das distâncias (Foix et al., 2011). Esta maior ou menor reflexão pode ser controlada com o ajuste do tempo de integração adequado, entretanto, três fatores dificultam tal ajuste (Foix et al., 2011):

- a) emissão não uniforme do sinal infravermelho: causa erros de distância para objetos mais distantes do centro da imagem (ver Figura 10). A não uniformidade do sinal infra-vermelho se assemelha ao efeito vinheta ("*vignetting*") que ocorre em outros tipos de iluminação artificial, e.g. a iluminação fornecida por uma lâmpada comum. Desta forma, pelo ponto de vista da câmera, a coleta das distâncias destes pontos sem correções, tende a formar uma superfície convexa. Na Figura 10, o plano está a 435 mm da câmera, mas os pixels mais distantes do centro da imagem têm sua distância variando radialmente para até 460 mm.

- b) Baixa iluminação em cenas com objetos muito distantes entre si;
- c) Objetos, ou regiões de um mesmo objeto, com índices de reflexão muito distintos: um objeto (ou uma região do objeto) muito refletivo e outro objeto (ou outra região do objeto) pouco refletivo, podem ter suas distâncias registradas com diferentes valores, mesmo estando a uma mesma distância do sensor. A Figura 11 apresenta a imagem de distância de um objeto em perspectiva e em vista lateral. Uma vez que este objeto possui regiões com refletividades distintas, as distâncias serão calculadas com valores também distintos.

Figura 10 – Efeito "*vignetting*" na imagem de distância.

Fonte: Foix et al. (2011).

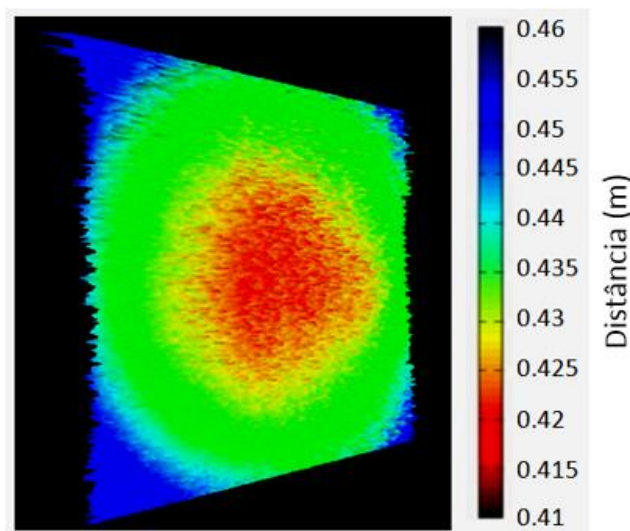
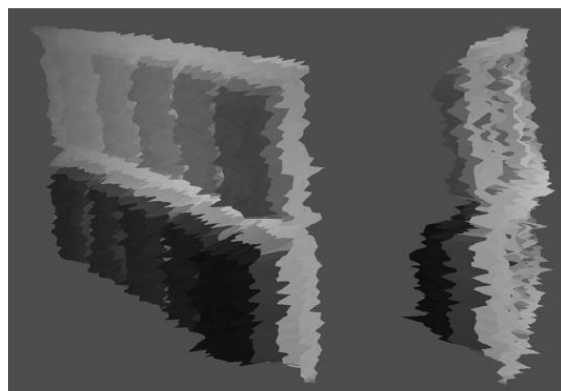


Figura 11 – Regiões com refletividades distintas terão distâncias com valores distintos, ainda que pertençam a um mesmo objeto.

Fonte: Lindner and Kolb (2007).

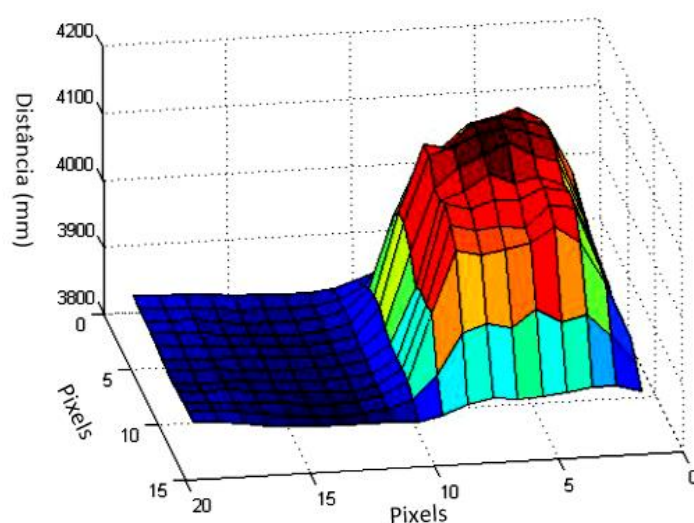




Da mesma forma, na Figura 12, tem-se a representação de uma imagem de distância de uma folha de papel, metade branca (à esquerda, azul) e metade preta (à direita, vermelho). Devido à diferença de refletividade entre as duas metades, há uma diferença de até 20 cm nos valores de distância calculados.

Figura 12 – Imagem de distância de uma folha de papel, metade branca (à esquerda) e metade preta (à direita).

Fonte: Falie e Buzuloiu (2007).

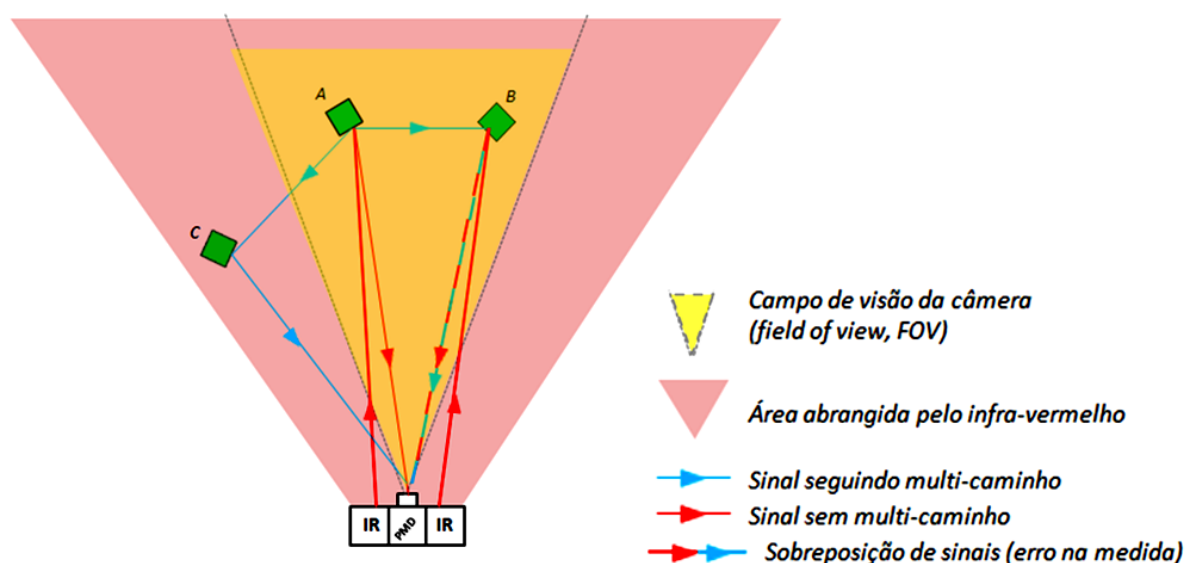


### 3.4.2.3 Multicaminho

Diferentemente do que ocorre com um aparelho de varredura a *laser*, que ilumina apenas um ponto por vez e calcula o valor da distância, nas câmeras de distância toda a cena é iluminada. O sinal incide sobre vários pontos ao mesmo tempo, podendo percorrer múltiplos caminhos por toda a cena. Por percorrer caminhos maiores entre a emissão e o retorno do sinal, a tendência é obter valores de distância maiores que o real – erro positivo – ainda que, teoricamente, por se tratar de uma soma vetorial, possa obter valores menores – erro negativo (Fuchs, 2012). A Figura 13 mostra o sinal percorrendo múltiplos caminhos, devido às características refletivas dos objetos presentes no ambiente.

Figura 13 – Multicaminho: sinal de retorno, refletido por diversos alvos, inclusive os não captados na imagem.

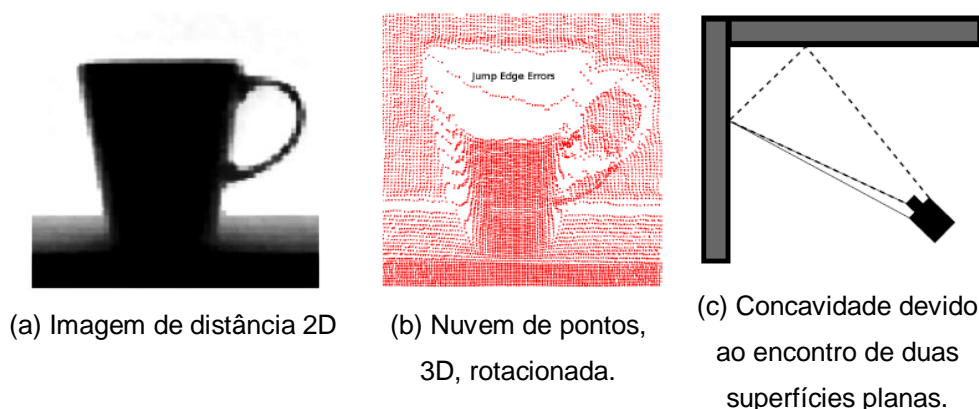
Fonte: Adaptado de Fuchs (2012).



O efeito do multicaminho pode ser observado nas cavidades e arestas dos objetos, quando há diferença de profundidade entre objetos anteriores e posteriores, pois tais cavidades ou arestas aparentam ter forma arredondada (May et al., 2009; Foix et al., 2011). Nestes locais, pela diferença de profundidade, surgem os chamados pixels flutuantes, que serão abordados mais adiante, no item 3.4.2.5. As Figuras 14a e 14b, mostram esta ocorrência nas bordas de uma xícara, com uma parede ao fundo. A Figura 14c mostra a ocorrência de multicaminho devido à concavidade pelo encontro de duas superfícies planas.

Figura 14 – Locais de ocorrência de multicaminho. (a) e (b) As bordas de uma xícara em frente à parede. (c) Concavidades na cena, como no encontro de duas superfícies planas.

Fonte: Foix et al. (2011).



Os erros devidos ao multicaminho não são previsíveis, pois dependem da topologia da cena, a qual é desconhecida *a priori* (Foix et al., 2011).

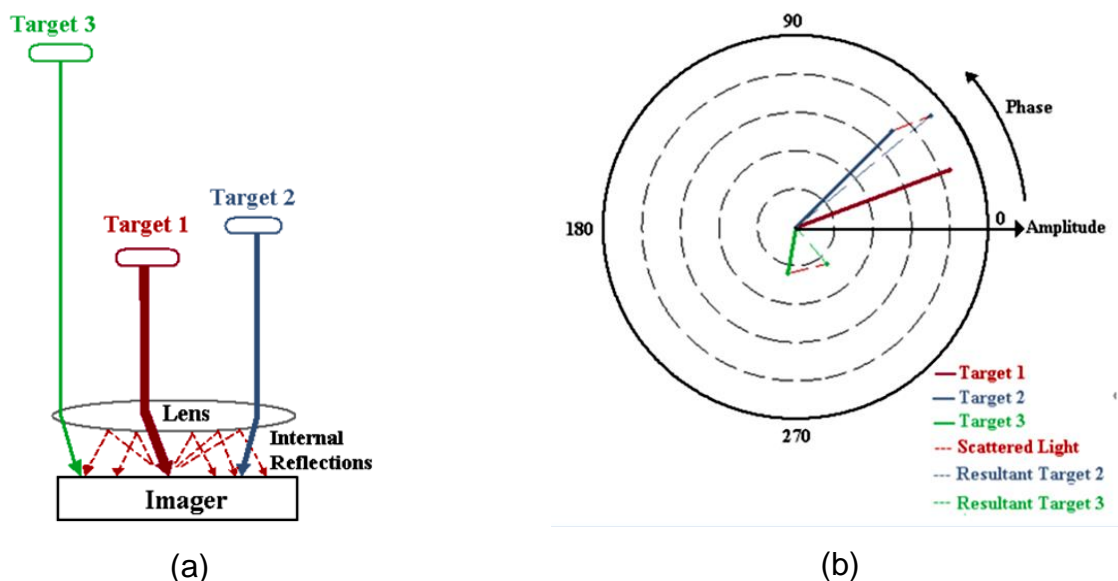
#### 3.4.2.4 Distorção por espalhamento interno

A distorção por espalhamento interno (*“internal scattering distortion”* ou *“light scattering”*) ocorre entre o conjunto de lentes da câmera e o sensor, quando há um objeto mais próximo à câmera – alvo anterior ou *foreground* – causando erros de medida em um objeto mais distante – alvo posterior ou *background*. Desta forma, o objeto mais distante aparenta estar mais próximo da câmera. Quanto mais próximo um objeto estiver da câmera e/ou quanto mais refletivo for este objeto, maior será o efeito causado nos objetos mais distantes (Karel, 2008; May et al., 2009).

A Figura 15 representa como ocorre este fenômeno. Esta distorção ocorre porque o sinal que retorna do Alvo 1 passa pela lente da câmera, incide sobre o sensor, e ecoa diversas vezes entre a lente e outras partes do sensor. Ao incidir sobre outras partes do sensor, há uma superposição deste sinal com os retornos dos Alvos 2 e 3, correspondendo a uma adição de sinais senoidais. Desta adição resulta um sinal mais forte, com amplitude e fase alteradas e, conseqüentemente, o valor da distância também é alterado (Karel et al., 2012).

Figura 15 – Representação do erro devido à distorção por espalhamento interno.

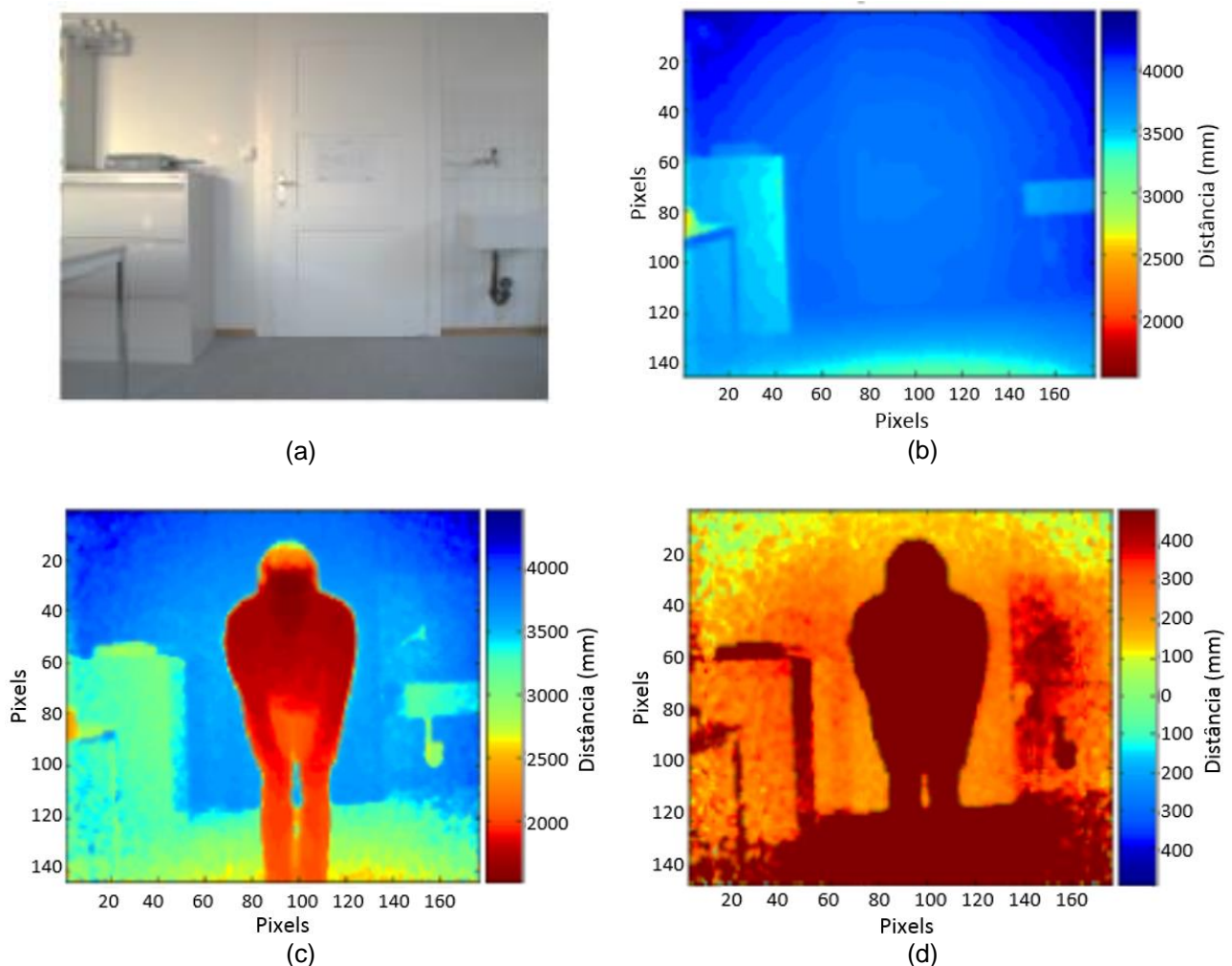
Fonte: Karel et al. (2012).



A Figura 16 permite visualizar este efeito nas imagens de distância: a Figura 16a é a imagem óptica; a Figura 16b, mostra uma imagem de distância onde há apenas o alvo posterior; a Figura 16c mostra uma imagem de distância onde há o alvo posterior e o alvo anterior; e a Figura 16d mostra a diferença entre as estas duas imagens citadas, onde a medida de distância do sensor até a parede da cena é encurtada de 100 mm a 400 mm (Mure-Dubois e Hügli, 2007).

Figura 16 – Visualização do erro devido ao espalhamento interno. (a) Imagem óptica da cena (b) Imagem de distância do alvo posterior, sem o alvo anterior; (c) imagem de distância com alvo anterior; (d) diferença entre as imagens “b” e “c”.

Fonte: Mure-Dubois e Hügli (2007).



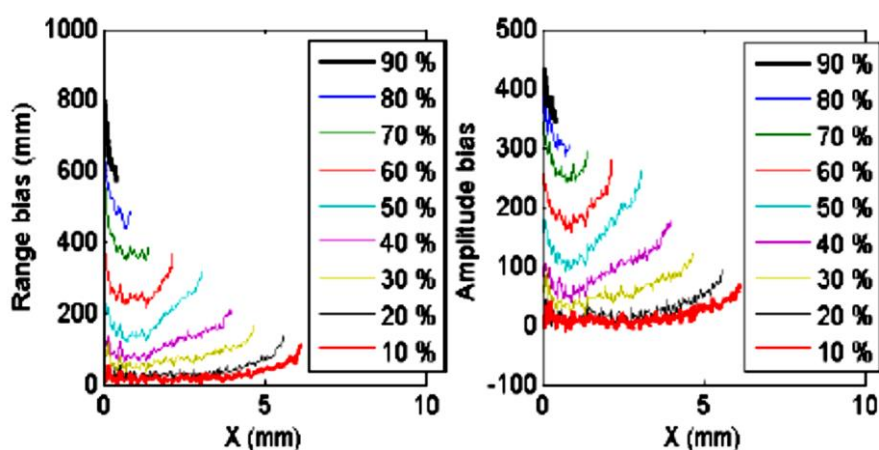
Jamtsho e Lichti (2010) realizaram experimentos para compensar os efeitos devido à distorção por espalhamento interno, ocasionados pelos seguintes fatores: área coberta pelo

alvo anterior sobre o alvo posterior, tempo de integração, e a distância do alvo anterior até a câmera.

A Figura 17 mostra dois gráficos com dados obtidos com a câmera SR 3000, relativos à uma linha central da imagem, para experimentos sobre a influência da área de cobertura do alvo anterior. O primeiro gráfico mostra o erro que ocorre na distância calculada, e o segundo gráfico mostra o erro que ocorre na amplitude, ambos em função da porcentagem de cobertura do alvo anterior sobre o alvo posterior. A variável  $X$  (mm), no eixo das abscissas, refere-se ao espaço imagem.

Figura 17 – Erros de distância e amplitude na câmera SR 3000 devido à distorção por espalhamento interno, em função da área coberta do alvo anterior sobre o alvo posterior.

Fonte: Jamtsho e Lichti (2010).



Jamtsho e Lichti (2010) concluíram que, para os experimentos com a câmera SR 3000:

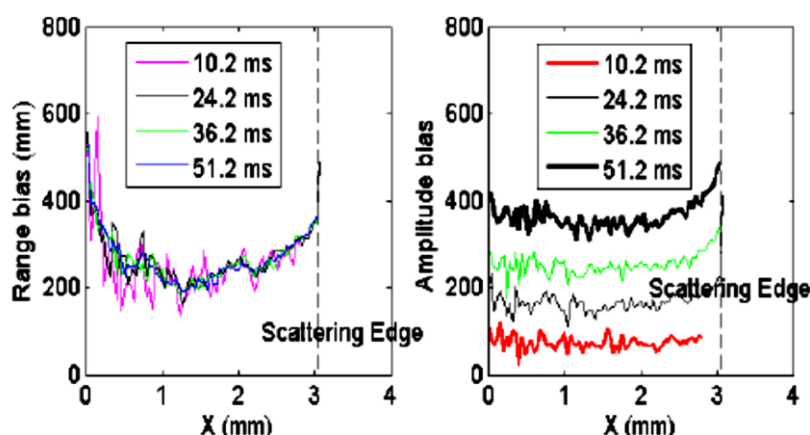
- os erros em amplitude e distância são proporcionais à área coberta pelo alvo anterior;
- a partir da borda do alvo anterior, os erros inicialmente decrescem, mas tendem a aumentar à medida que se aproxima da periferia da imagem; tal aumento do erro próximo à periferia da imagem foi atribuído ao efeito vinheta. Este efeito é conhecido desde as fotografias tradicionais em filme, onde se verifica a perda de intensidade da luz nas bordas das fotografias; as câmeras digitais atuais suavizam este efeito.
- os erros nas bordas do alvo anterior não ocorrem igualmente por toda a imagem, o que indica a influência de outras fontes de erro no efeito de espalhamento interno.

Na Figura 18 são mostrados os erros de distância e amplitude em função do tempo de integração, sendo que, para tal experimento, o alvo posterior estava 50% coberto pelo alvo anterior. Verificou-se que, para a câmera SR 3000, o efeito do espalhamento interno sobre

os valores de distância, apresenta pequena variação em função da alteração do tempo de integração utilizado. Entretanto, os valores de amplitude são diferentemente afetados pelo espalhamento interno, de acordo com o tempo de integração utilizado, de forma que, quanto maior o tempo de integração utilizado, maior a variação da amplitude.

Figura 18 – Erros de distância e amplitude devido à distorção por espalhamento interno, em função do tempo de integração, para a câmera SR 3000.

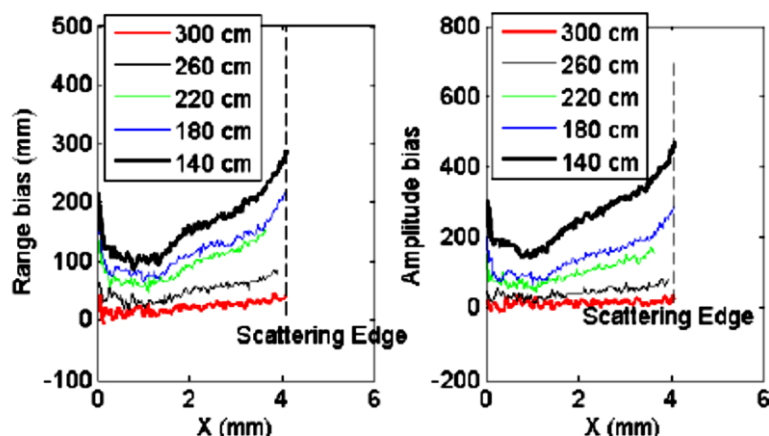
Fonte: Jamtsho e Lichti (2010).



Já na Figura 19 são mostrados os erros de distância e amplitude em função da distância da câmera ao alvo anterior, sendo que o alvo posterior permanecia 50% coberto pelo alvo anterior. Verificou-se que, para a câmera SR 3000, o efeito do espalhamento interno sobre os valores de distância e de amplitude variam conforme a distância ao alvo.

Figura 19 – Erros de distância e amplitude devido à distorção por espalhamento interno, em função da distância do alvo anterior até a câmera.

Fonte: Jamtsho e Lichti (2010).





Para modelar tais erros, ocorridos no alvo posterior, foram utilizados dois modelos: o primeiro com uma superfície 3D para ajustamento e o segundo com uma *spline* cúbica. Obtiveram sucesso da ordem de 60% a 80%, sendo que o primeiro modelo obteve melhores resultados.

Experimentos de Karel et al. (2010), também com a câmera SR 3000, quantificaram os efeitos do espalhamento interno nas distâncias calculadas. Nestes experimentos os autores descartam a influência do tempo de integração no efeito do espalhamento interno para os valores de distância calculados, assim como fizeram Jamtsho e Lichti (2010).

Tanto Jamtsho e Lichti (2010), quanto Karel et al. (2010), realizaram tais estudos para verificar as distorções ocorridas no alvo posterior (*background*).

### 3.4.2.5 Alteração brusca de profundidade (pixels flutuantes)

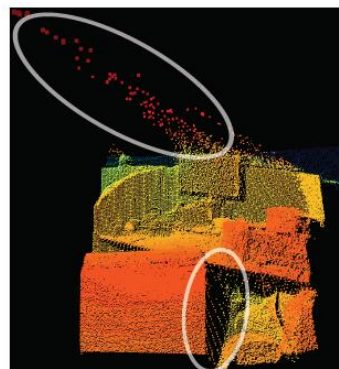
Em algumas imagens de distância percebe-se a presença de pixels isolados, localizados nos vãos entre objetos que estão a diferentes profundidades, sendo que, na realidade, não há objetos neste vão. Estes são chamados pixels flutuantes, conhecidos na literatura estrangeira de “*flying pixels*”, “*mixed pixels*” ou “*jumping edges*” (Lindner e Kolb, 2007; Reynolds et al., 2011; Sabov e Krüger, 2008). Aparecem nas imagens de distância como resultado dos efeitos do espalhamento interno e/ou do multicaminho. A Figura 20 mostra estes pixels flutuantes identificados em vermelho, em regiões onde há brusca variação de profundidade entre objetos.

Figura 20 – Ocorrência de pixels flutuantes. (a) Imagem de intensidade; (b) Imagem de distância, com pixels flutuantes em vermelho.

Fonte: Reynolds et al. (2011).



(a)

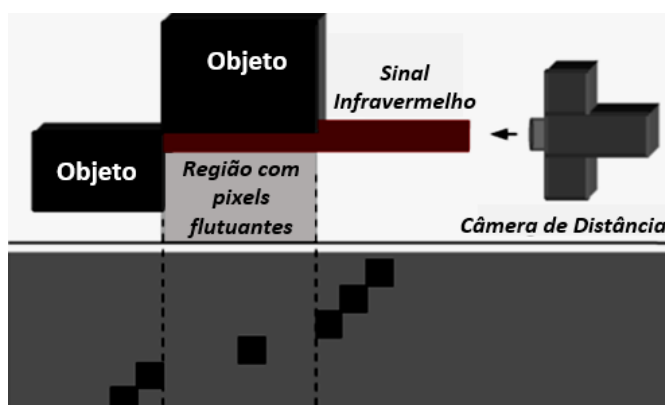


(b)

Na Figura 21 observa-se uma ilustração da região onde há a ocorrência de pixels flutuantes.

Figura 21 – Pixels flutuantes entre faces de objetos a diferentes distâncias da câmera.

Fonte: Sabov e Krüger (2008).



O sinal infravermelho emitido pela câmera incide parcialmente sobre a borda de um objeto mais próximo e parcialmente sobre outro objeto mais distante, de forma que a distância calculada será um valor intermediário entre a distância maior e a menor, como se houvessem objetos localizados em distâncias intermediárias.

Através da calibração da câmera, a maioria das fontes de erro podem ter seus efeitos minimizados no momento da obtenção da imagem. Entretanto, a ocorrência de pixels flutuantes só pode ser minimizada após a obtenção da imagem, mediante tratamentos sobre a mesma (Lindner e Kolb, 2007).

#### 3.4.2.6 Iluminação ambiente

Por iluminação ambiente entende-se a iluminação externa passiva que incide sobre o sensor. Segundo Möller et al. (2005), se a iluminação ambiente (externa) for mais intensa que a iluminação provida pelas fontes da câmera (ativa, fornecida pelos LEDs), poderá ocorrer dois problemas nas imagens captadas pelo sensor: (1) Ruídos na imagem, o que ocasiona erros na medida da distância e; (2) Saturação do pixel, o que impossibilita o cálculo da distância. A maior fonte de iluminação externa é o Sol, pois a iluminação solar é muito mais intensa do que a iluminação ativa da câmera, numa razão que pode chegar a valores em torno de 18000 / 1.

Para melhorar a SNR, reduzindo ruídos na imagem e/ou a saturação do pixel, algumas medidas podem ser implementadas:



- a) Ajustar o Tempo de Integração: tempos de integração baixos captam menos energia, evitando a saturação do pixel.
- b) Aumentar o número de emissores de energia (LED - *Light-Emitting Diode*) ou aumentar a sua potência: esta medida acarreta maior consumo de energia, bem como pode representar perigo à saúde dos olhos do usuário (Kahlmann, 2007).
- c) Utilizar filtros espectrais: para limitar a captação da energia eletromagnética a uma faixa mais estreita do espectro (Möller et al., 2005).
- d) Utilizar o modo *Burst*: uma forma de melhorar o valor de SNR é através do aumento da potência do sinal emitido em um curto espaço de tempo (May et al., 2007). No modo *Burst* o sinal emitido é amplificado e o tempo para captação da luz é reduzido.

Algumas câmeras são dotadas de um circuito para suprimir instantaneamente a incidência da iluminação ambiente, são os circuitos SBI (*Suppression of Background Illumination*). Segundo Möller (2005), tal circuito suprime os sinais não correlacionados com o sinal emitido, evitando a saturação do pixel. Para isso, adiciona cargas nos terminais de leitura, de modo a compensar, instantaneamente, os efeitos da saturação causados por sinais não correlacionados durante o processo de integração. A câmera PMD Camcube 3.0 possui circuito SBI.

### **3.4.3 Outras fontes de erro**

Além das fontes de erro citadas anteriormente – devidas às características do ambiente ou do equipamento –, ainda ocorrem erros devido ao ângulo de incidência do sinal no alvo e da distância entre os alvos e a câmera.

#### **3.4.3.1 Ângulo de incidência**

Segundo estudos de Hebert e Krotkov (1992) e Anderson et al. (2005), a variância na medição de distâncias ( $\sigma_R$ ) com equipamento de onda contínuas de amplitude modulada (*AM-CW*, do inglês *amplitude-modulated continuous-wave*) é diretamente proporcional ao comprimento de onda ( $\lambda$ ) e ao quadrado da distância ao alvo ( $R^2$ ), e inversamente

proporcional à refletividade do alvo ( $\rho$ ) e ao cosseno do ângulo de incidência sobre o alvo ( $\alpha$ ), sendo matematicamente representado pela Equação 15, a seguir.

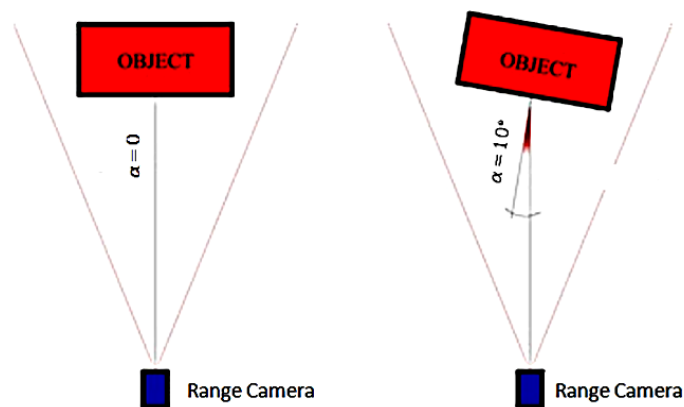
$$\sigma_R^2 \propto \frac{\lambda \cdot R^2}{\rho \cdot \cos \alpha} \quad (15)$$

O ângulo de incidência do sinal sobre o alvo é formado pelo eixo óptico da câmera e o vetor normal à superfície deste alvo, conforme se observa na Figura 22. Pela Equação 15, se forem mantidos constantes o comprimento de onda, a distância ao alvo, e a refletividade deste alvo, a variância irá aumentar conforme se diminui o ângulo de incidência (inversamente proporcional).

Segundo Kim et al. (2008), apesar da Equação 15 ser útil sob o ponto vista prático, esta não é adequada, uma vez que considera fatores não mensuráveis diretamente (refletividade  $\rho$  e ângulo de incidência  $\alpha$ ). Além disso, tem-se outros problemas: (a) a refletividade e o ângulo de incidência possuem correlação com as variações de amplitude; a amplitude é inversamente proporcional à razão sinal/ruído; (b) a temperatura e o tempo de integração não foram considerados; (c) o comprimento de onda, uma vez fixado pela câmera TOF, pode ser ignorado e; (d) não considera a variância da ocorrência de pixels flutuantes.

Figura 22 – O ângulo de incidência do sinal ( $\alpha$ ) sobre o alvo, em graus.

Fonte: Adaptado de Piatti (2011).



Piatti (2011) realizou experimentos com a câmera SR-4000 medindo a distância entre a câmera e um alvo totalmente branco, onde analisou as alterações na variância quando se girava este alvo, tanto em sentido horário quanto anti-horário. Este ajuste automático do

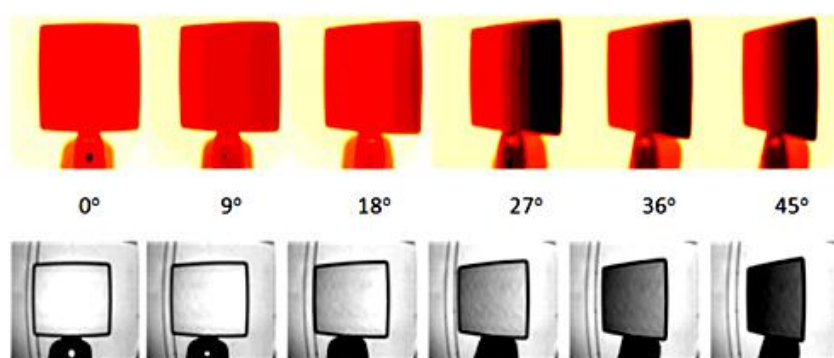
tempo de aquisição é realizado visando evitar a saturação do pixel e obter a melhor relação entre a taxa de aquisição de imagens (*frame rate*) e os ruídos na imagem.

Obtendo imagens a cada 9° (nove graus), verificou que, utilizando a função de ajuste automático do tempo de aquisição, não houve alteração significativa nos valores das distâncias em função do ângulo de incidência.

As imagens obtidas a cada rotação de 9° são mostradas na Figura 23. Optou-se por mostrar a imagem adaptada para graus, ao invés dos grados adotados pelo autor, pois trata-se de uma unidade de medida de ângulos mais usual. Não foram testados ângulos superiores a 45° devido à baixa confiabilidade nos valores obtidos.

Figura 23 – Imagens tomadas para diferentes ângulos de incidência.

Fonte: Adaptado de Piatti (2011).

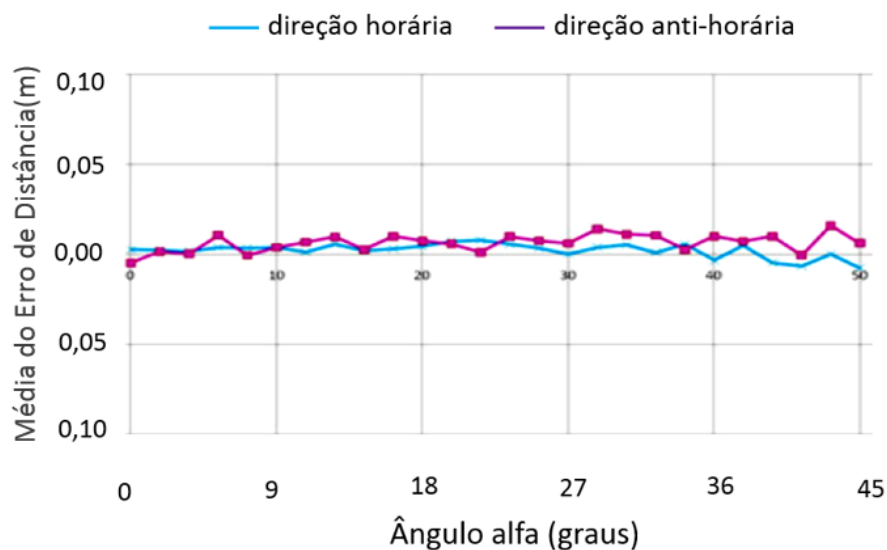


Os resultados de Piatti (2011) foram obtidos avaliando a parte central das imagens de distância, em uma janela de 65 x 61 pixels, de forma a não haver interferência de pixels flutuantes existentes nas bordas do alvo.

A Figura 24 mostra o gráfico da variação das médias obtidas para todos os pixels da janela em relação ao ângulo de incidência adotado. Observa-se a baixa variação da média.

Figura 24 – Gráfico relacionando a média do erro de distância e o ângulo de incidência.

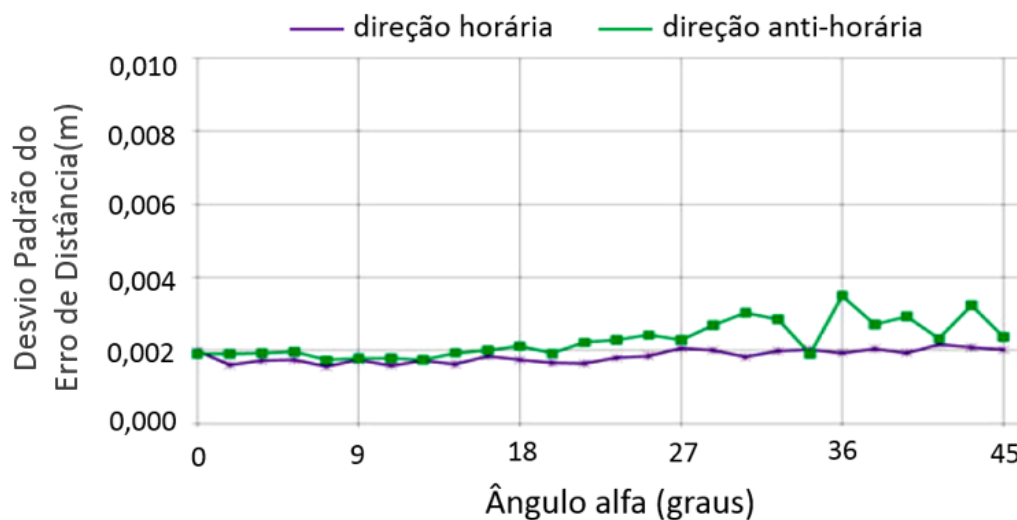
Fonte: Adaptado de Piatti (2011).



Já na Figura 25 mostra-se o gráfico da variação do desvio padrão dos valores de todos os pixels da janela em relação ao ângulo de incidência adotado. Observa-se que, também para a variância, houve uma baixa variação.

Figura 25 – Gráfico relacionando o desvio padrão do erro de distância e o ângulo de incidência.

Fonte: Adaptado de Piatti (2011).



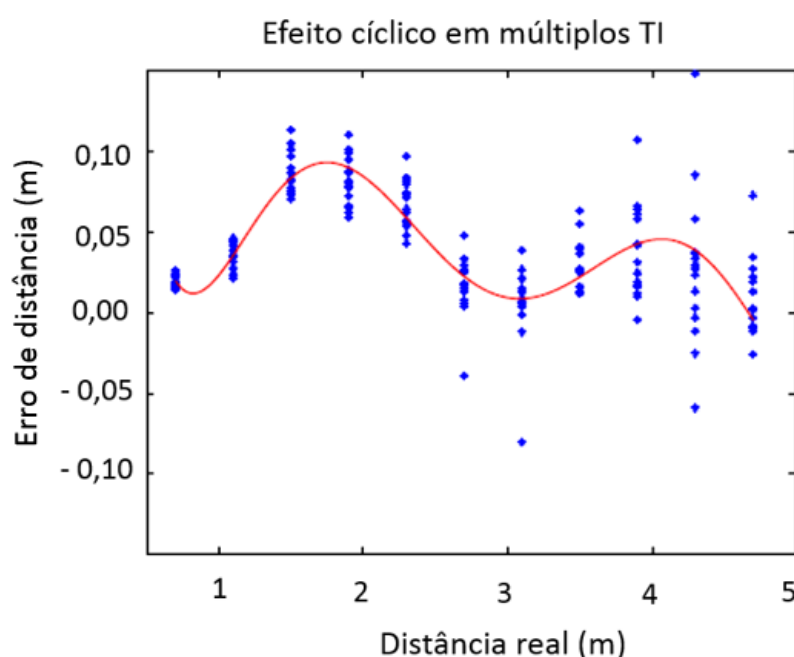
### 3.4.3.2 Distorção de distância

Um dos principais erros que afetam as medidas de distância coletadas com as câmeras deve-se à incapacidade da perfeita modulação do sinal emitido, segundo um modelo matemático teórico – geralmente uma função senoidal – utilizado pela câmera. Isto é, devido à limitações tecnológicas e de custo, o sinal não se ajusta perfeitamente com o modelo matemático estabelecido, gerando erros nas medidas calculadas (Lindner et al., 2010; Kolb et al. 2010; Foix et al., 2011).

Este erro é sistemático, depende da distância, e é conhecido na literatura estrangeira como "*wiggling error*" ou "*circular error*". Pode ser visualizado mediante um gráfico que relacione a distância medida pela câmera e a distância admitida como verdadeira – ou o erro – sendo que o erro tende a seguir uma curva senoidal, conforme se observa na Figura 26 (Foix et al., 2011).

Figura 26 – Efeito cíclico: gráfico relacionando o erro de distância e a distância real.

Fonte: Foix et al. (2011).



## 3.5 AJUSTAMENTO DE OBSERVAÇÕES

O ajustamento de observações visa associar, da melhor maneira, observações a um modelo matemático conhecido. Para tanto, possibilita encontrar valores dos parâmetros do

modelo matemático que melhor tornam as observações coerentes a este modelo matemático (Gemael, 2004).

O método mais comum para realizar o ajustamento é o método dos mínimos quadrados (M.M.Q.), na forma paramétrica. O método dos mínimos quadrados obtém os valores dos parâmetros de um modelo matemático que se ajustam às observações, tornando mínima a soma dos quadrados dos resíduos ( $v$ ), isto é, a soma das diferenças entre os valores das observações realizadas e aqueles valores de observações calculados pelo modelo matemático, é mínima, conforme Equação 16 (Gemael, 2004; Dalmolin, 2009) .

$$\sum_{i=1}^n v_i^2 = \text{mínimo}. \quad (16)$$

A Equação 17, representada na forma matricial, tem a seguinte forma:

$$V^T \cdot P \cdot V \rightarrow \text{mínimo} \quad (17)$$

onde  $V$  é o vetor dos resíduos,  $P$  é a matriz Peso (que considera a precisão das observações) e  $V^T$  é o vetor transverso dos resíduos.

### 3.5.1 Método paramétrico para funções não lineares

O método dos mínimos quadrados realizados pelo método paramétrico presuppõe que os valores observados ajustados podem ser expressos, de maneira explícita, como uma função dos parâmetros ajustados, atendendo o modelo matemático funcional mostrado na Equação 18 (Mikhail, 1976; Gemael, 2004; Dalmolin, 2009):

$$L_a = F(X_a) \quad (18)$$

Onde  $F$  é o modelo matemático funcional não linear,  $L_a$  é o vetor das observações ajustadas e  $X_a$  é o vetor dos parâmetros ajustados. As Equações de  $L_a$  e  $X_a$  são mostradas nas Equações 19 e 20 (Gemael, 2004; Dalmolin, 2009):

$$L_a = L_b + V \quad (19)$$

$$X_a = X_o + X \quad (20)$$

sendo  $L_b$  o vetor dos valores observados,  $V$  o vetor dos resíduos,  $X_o$  o vetor dos valores aproximados dos parâmetros e  $X$  o vetor dos parâmetros corrigidos.

Substituindo o primeiro membro pela Equação 21 e linearizando o segundo membro pela fórmula de Taylor, tem-se que

$$L_b + V = F(X_o + X) = F(X_o) + \left. \frac{\partial F}{\partial X_a} \right|_{X_a=X_o} \cdot X \quad (21)$$

Sendo a função dos parâmetros aproximados representada na Equação 22,

$$L_o = F(X_o) \quad (22)$$

e a matriz de derivadas parciais dada pela Equação 23,

$$A = \left. \frac{\partial F}{\partial X_a} \right|_{X_o} \quad (23)$$

a Equação 23 pode ser escrita como mostrado nas Equações 24 e 25, a seguir:

$$L_b + V = L_o + A \cdot X \quad (24)$$

$$V = A \cdot X + L_o - L_b \quad (25)$$

Sendo o vetor  $L$  (Equação 26) o vetor das observações ajustadas, tem-se o modelo matemático linearizado do método paramétrico, representado na Equação 27, a seguir:

$$L = L_o - L_b \quad (26)$$

$$V = A \cdot X + L \quad (27)$$

Substituindo a Equação 27 na Equação 17, tem-se:

$$(A \cdot X + L)^T \cdot P \cdot (A \cdot X + L) \rightarrow \text{mínimo} \quad (28)$$

Desenvolvendo-se a Equação 28,

$$\begin{aligned} &= (X^T \cdot A^T + L^T) \cdot P \cdot (A \cdot X + L) \\ &= X^T \cdot A^T \cdot P \cdot A \cdot X + X^T \cdot A^T \cdot P \cdot L + L^T \cdot P \cdot A \cdot X + L^T \cdot P \cdot L \\ &= X^T \cdot A^T \cdot P \cdot A \cdot X + 2 \cdot X^T \cdot A^T \cdot P \cdot L + L^T \cdot P \cdot L = \text{mínimo} \end{aligned}$$

bem como derivando em relação aos parâmetros do vetor X, igualando a zero, e desenvolvendo o resultado, tem-se a Equação 29.

$$\begin{aligned} &= \frac{\partial (X^T \cdot A^T \cdot P \cdot A \cdot X + 2 \cdot X^T \cdot A^T \cdot P \cdot L + L^T \cdot P \cdot L)}{\partial X} \\ &= 2 \cdot A^T \cdot P \cdot A \cdot X + 2 \cdot A^T \cdot P \cdot L = 0 \\ &= A^T \cdot P \cdot A \cdot X + A^T \cdot P \cdot L = 0 \\ &X = -(A^T \cdot P \cdot A)^{-1} \cdot A^T \cdot P \cdot L \end{aligned} \quad (29)$$

Designando o primeiro termo da Equação 29 por N (Equação 30) e o segundo termo por U (Equação 31)

$$N = A^T \cdot P \cdot A \quad (30)$$

$$U = A^T \cdot P \cdot L \quad (31)$$

Resulta a Equação 32, a seguir:

$$NX + U = 0 \quad (32)$$

Por fim, a solução do sistema matricial é o vetor X, dos parâmetros ajustados do modelo matemático funcional, mostrada na Equação 33.

$$X = -N^{-1} \cdot U \quad (33)$$



Assim, os valores do vetor  $X$  são os parâmetros que melhor ajustam o modelo matemático às observações, de modo que o somatório do quadrado dos resíduos seja mínimo.

### **3.6 ESTATÍSTICA: TESTE DE HIPÓTESE PARA MÉDIA DE POPULAÇÕES NORMAIS COM VARIÂNCIAS CONHECIDAS**

A Estatística fornece métodos para validação de resultados de pesquisas, estudos, avaliações, etc., garantindo maior credibilidade às conclusões. Através do teste de hipóteses da Inferência Estatística é possível, a partir de uma amostra de uma população, estimar parâmetros que representem toda a população.

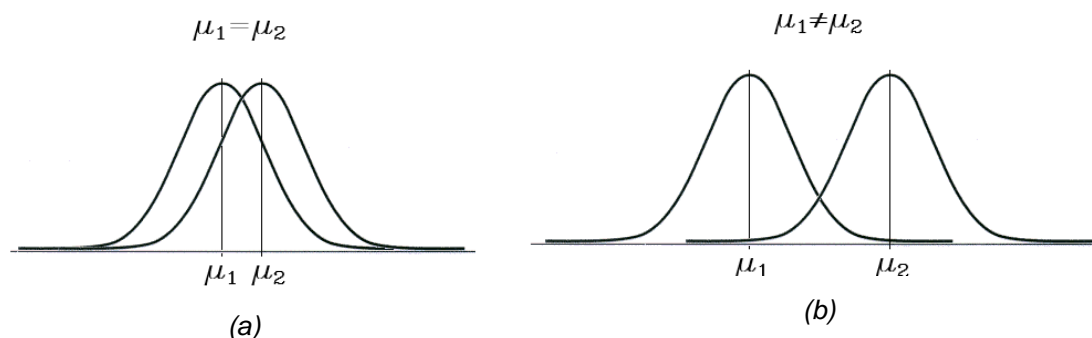
Para analisar os parâmetros populacionais a partir de amostras, o pesquisador supõe duas hipóteses (Spiegel, 1977; Rumsey, 2009):

- a hipótese nula ( $H_0$ ), que é aquela em que o pesquisador supõe que “nada de novo” – nada significativo – irá acontecer, isto é, que o parâmetro populacional será estatisticamente igual ao da amostra, e;
- a hipótese alternativa ( $H_1$ ), ou hipótese de pesquisa, que é aquela em que o pesquisador supõe que “algo de novo” – algo significativo – irá surgir, isto é, o parâmetro populacional será estatisticamente diferente do da amostra.

Assim, se a hipótese nula não é rejeitada, admite-se que não foi encontrado resultado estatístico significativo, isto é, as diferenças observadas no valor do parâmetro são devidas à flutuações das amostras provenientes de uma mesma população (Spiegel, 1977). As Figuras 27a e 27b ilustram, respectivamente, curvas de populações estatisticamente iguais e curvas de populações estatisticamente diferentes. No caso da Figura 27a, há uma área muito grande de interseção para as duas populações, de modo que vários elementos destas populações podem pertencer tanto à população 1 quanto à população 2, sendo assim, não há como afirmar, com segurança, que pertença apenas à uma das populações. Já no caso da Figura 27b, esta região de interseção é menor, havendo maior segurança em afirmar se um determinado elemento da amostra pertence à população 1 ou à população 2.

Figura 27 – Populações: (a) estatisticamente iguais; (b) estatisticamente diferentes.

Fonte: Spiegel (1977).



Para alguns experimentos pode ser necessário atestar se houve alteração nos parâmetros em função de algum agente externo, ou alguma modificação no valor de uma variável envolvida nos experimentos. Assim, a hipótese nula supõe que nada acontecerá e que o parâmetro avaliado – a média, por exemplo – não apresentará diferença estatística significativa. Já a hipótese alternativa, ao contrário, supõe que o parâmetro avaliado apresentará diferença estatística significativa. As hipóteses nula e alternativa estão representadas pelas Equações 34 e 35, respectivamente.

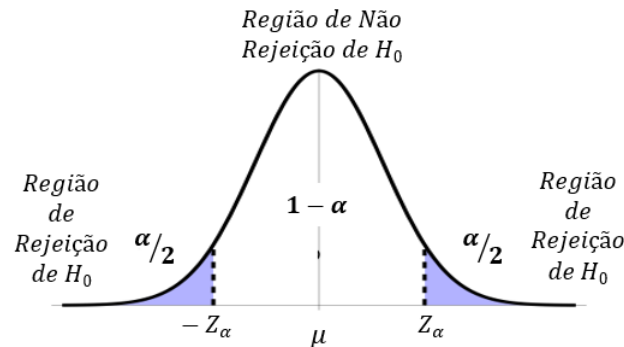
$$H_0 : \mu_1 = \mu_2 \quad (34)$$

$$H_1 : \mu_1 \neq \mu_2 \text{ (bilateral) ou } \mu_1 > \mu_2 \text{ (unilateral à direita) ou } \mu_1 < \mu_2 \text{ (unilateral à esquerda)} \quad (35)$$

A hipótese alternativa poderá supor que o parâmetro populacional será menor, maior, ou apenas diferente do parâmetro da amostra. Ao supor que é diferente, utiliza-se o teste bilateral e, sendo uma amostra grande ( $n > 30$ ), admite-se como Normal e pode-se fazer uso da curva de distribuição normal padronizada, representada na Figura 28.

Figura 28 – Regiões de rejeição e não rejeição da hipótese nula, para distribuição normal padrão, em teste bilateral.

Fonte: o Autor.



Inicialmente, para realizar este teste, deve-se definir qual a probabilidade máxima a qual o pesquisador se sujeitaria a correr o risco de cometer o chamado “erro tipo 1”, isto é, erro ao rejeitar a hipótese nula sendo ela verdadeira. Esta probabilidade é conhecida como nível de significância do teste e é representada pela letra  $\alpha$ . A probabilidade complementar a esta ( $1 - \alpha$ ) é o nível de confiança do teste (Spiegel, 1977). Ao definir o nível de confiança do teste, define-se os limites ( $Z_\alpha$ ) para rejeição ou não rejeição (aceitação) da hipótese nula.

A estatística  $Z_{calc}$  amostral é calculada conforme a Equação 36,

$$Z_{calc} = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sqrt{\frac{(s_1)^2}{n_1} + \frac{(s_2)^2}{n_2}}} \quad (36)$$

onde  $Z_{calc}$  = variável normal padronizada (quantidade de desvios padrão a contar da média);  $\bar{x}_1$  = média da amostra da população 1;  $\bar{x}_2$  = média da amostra da população 2;  $s_1$  = desvio padrão da amostra da população 1;  $s_2$  = desvio padrão da amostra da população 2;  $n_1$  = tamanho da amostra da população 1 e;  $n_2$  = tamanho da amostra da população 2.

Pela Equação 19 verifica-se que, quanto mais distantes estiverem as médias, quanto menor forem os desvios padrões ou quanto maiores forem as amostras, maior será o valor de  $Z_{calc}$ . E quanto maior o valor absoluto de  $Z_{calc}$ , mais próximo das regiões de rejeição da hipótese nula, ou seja, mais próximo de considerar que há diferença estatística significativa entre as populações. O Quadro 1 mostra as situações possíveis para o teste de hipótese e seu entendimento.

Quadro 1 – Teste de Hipótese.

Resultado	Hipóteses	Isso quer dizer que :
$Z_{\text{calc}} < Z_{\alpha}$ e $Z_{\text{calc}} > -Z_{\alpha}$	Aceita-se (não se rejeita) a hipótese nula.	Não ocorreu nada de novo. O parâmetro populacional é estatisticamente igual ao da amostra. O resultado não é significativo.
$Z_{\text{calc}} > Z_{\alpha}$ ou $Z_{\text{calc}} < -Z_{\alpha}$	Rejeita-se a hipótese nula.	O parâmetro populacional não é estatisticamente igual ao da amostra. O resultado é significativo.

## 4. EQUIPAMENTOS E MATERIAIS

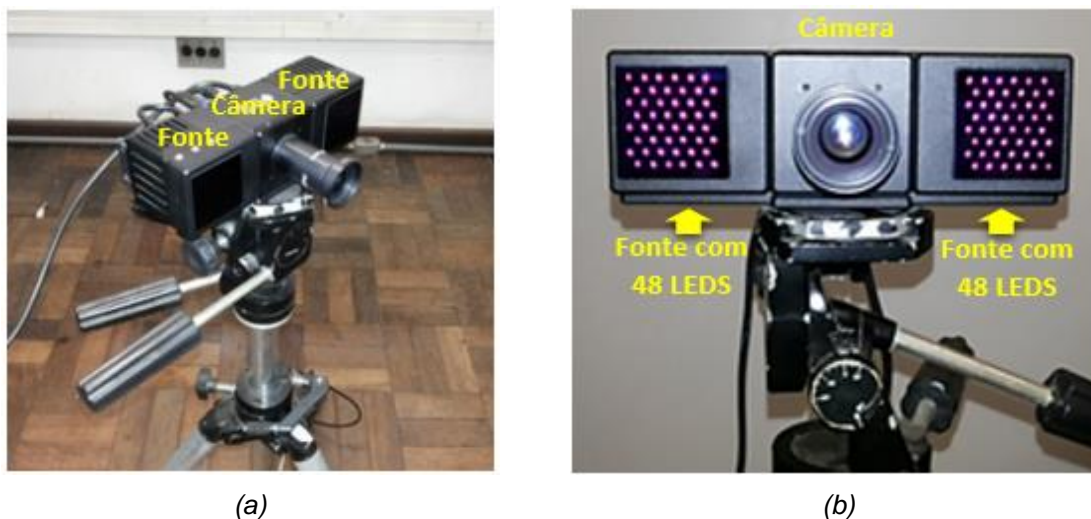
Foram utilizados os seguintes materiais e equipamentos: câmera PMD Camcube 3.0, interferômetro, alvos, luxímetro, dimmer, e lâmpadas.

### 4.1 CÂMERA PMD CAMCUBE 3.0

Foi utilizada uma Câmera PMD CamCube 3.0, do Departamento de Geomática da UFPR. Esta câmera é mostrada na Figura 29, com fontes de iluminação de LED acopladas nas laterais. Cada uma das fontes de iluminação possui 48 diodos emissores de luz (LEDs), que emitem luz infravermelha. A câmera foi apoiada sobre tripé com regulagem de altura e rotações nos três eixos principais.

Figura 29 – Câmera PMD CamCube 3.0, com fontes de iluminação LED acopladas nas laterais: (a) vista em perspectiva da câmera; (b) vista frontal da câmera, mostrando os 48 LEDs em cada fonte de iluminação, à esquerda e à direita da câmera.

Fonte: o Autor.



Utiliza um sensor de imageamento PMD (*Photonic Mixer Device*), da empresa PMD Technologies, que consiste em um chip, 200x200 pixels, de tecnologia CMOS padrão, com a capacidade de calcular a distância para cada pixel.

A distância entre o sensor e o alvo é obtida pelo método da diferença de fase, correlacionando o sinal emitido (modulado em amplitude e frequência) e o sinal de retorno

ou refletido (demodulado), assumindo que este sinal de retorno possui a forma senoidal (Oliveira et al., 2010). O sinal emitido pela câmera PMD Camcube 3.0 pode ser configurado pelo usuário nas frequências de modulação com os valores inteiros de 18 MHz, 19 MHz, 20 MHz ou 21 MHz. Já a amplitude não pode ser configurada pelo usuário. Também é possível alterar o tempo de integração da câmera, no intervalo de valores desde 12  $\mu$ s até 50000  $\mu$ s (PMDTec GmbH, 2010). Estas e outras especificações técnicas da câmera são mostradas no Quadro 2.

Quadro 2 – Principais especificações técnicas da câmera PMD CamCube 3.0.

Fonte: PMDTec GmbH (2010); Piatti (2011)

Sensor PhotolCs 41k-S2	200 x 200 pixels
Distância focal	12,8 mm
Campo de Visão (FOV)	40° x 40°
Comprimento de onda padrão	870 nm
Frequências de modulação possíveis	18, 19, 20 e 21 MHz
Tempos de Integração possíveis	de 12 $\mu$ s a 50000 $\mu$ s
Taxa máxima de aquisição de imagens	40 fps
Intervalo de distância de trabalho	de 30 cm a 7,50 m
Dimensões	60 x 194 x 60 mm
Peso	1,438 Kg

Salienta-se que esta câmera dispõe de uma tecnologia para minimizar os efeitos da luz ambiente nas imagens captadas. Trata-se do dispositivo SBI (*Suppression of Background Light*), cujo objetivo é permitir utilizar a câmera em ambientes externos.

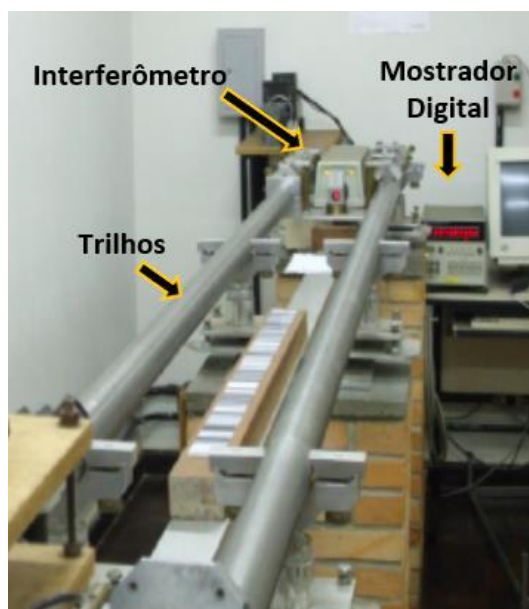
## 4.2 INTERFERÔMETRO LASER

Para obter um conjunto de medidas de referência com maior exatidão e precisão, foi utilizado um interferômetro da marca Hewlett-Packard, modelo 5508A. Localizado no Laboratório de Instrumentação Geodésica – LAIG – da UFPR, este interferômetro possui trilhos metálicos com, aproximadamente, 4,2 metros de comprimento (ver Figura 30), sendo capaz de obter medidas com precisão de até  $10^{-8}$  m. Uma vez que esta precisão é superior

à necessária para as correções das distâncias medidas pela câmara de distância, optou-se por medir com precisão de  $10^{-5}$  m.

Figura 30 – Interferômetro Laser, com mostrador digital das medidas e trilhos.

Fonte: o Autor.



### 4.3 ALVOS

Para o experimento do erro de distância câmera-alvo (experimento 1), o alvo consiste de chapa de madeira compensada, de cor branca, sobre trilhos do interferômetro. No experimento dos erros devido à iluminação ambiente (experimento 2), consiste em uma parede de alvenaria, rebocada e pintada na cor branca. Já para o experimento dos erros devido à cor do alvo (experimento 3), os alvos são folhas nas cores preta, cinza e branca, fixadas na parede. Tais alvos podem ser vistos na Figura 31.

Para os Experimentos 1 e 2, escolheu-se alvos de cor branca. Segundo experimentos de Lindner e Kolb (2007) e Lindner et al. (2010), que utilizaram um tabuleiro composto de quadrados pretos e brancos, foi verificado que a diferença de energia refletida entre os quadrados brancos e os quadrados pretos interfere no cálculo da distância. Isto porque a amplitude do sinal de retorno refletido pelos quadrados brancos será maior, e a variação da amplitude causa variação no cálculo da distância. Visto que tal ocorrência não era desejada, optou-se por um alvo de cor única, branca, para possibilitar a mesma reflectância em todo o alvo.

Figura 31 – Alvos: (a) Experimento 1: chapa de madeira ; (b) Experimento 2: parede;  
(c) Experimento 3: folha na parede.



(a)



(b)



(c)

#### 4.4 LUXÍMETRO

Para o experimento de iluminação ambiente foi utilizado um luxímetro da marca ICEL Manaus, modelo SP-2000, mostrado na Figura 32. Este aparelho mede o nível iluminância (E) em um determinado local, seja com luz solar ou artificial. Suas especificações técnicas são mostradas no Quadro 4.

Figura 32 – Luxímetro ICEL SP-2000 utilizado no experimento de iluminação ambiente.

Fonte: o Autor.



Quadro 3 – Principais especificações técnicas do luxímetro ICEL SP-2000.

Escala	1999 W/m <sup>2</sup> ; 634 btu/(ft <sup>2</sup> *h)
Taxa de amostragem	≈ 0,25 segundos
Resolução	0,1W/m <sup>2</sup> ; 0,1 Btu/(ft <sup>2</sup> *h)
Exatidão	±10W/m <sup>2</sup> [±3Btu/(ft h)] ou 5%, o que for maior à luz do Sol.



## 4.5 LÂMPADA E DIMMER

Foram utilizadas duas lâmpadas halógenas, modelo Halopar38, da marca Osram (Figura 33a), e um *dimmer* modular universal, marca SkillTec (Figura 33b).

Figura 33 – (a) Lâmpada halógena Halopar 38 ; (b) *Dimmer* modular universal.



(a)



(b)

A lâmpada halógena utilizada possibilita a orientação dos feixes de luz com ângulo de abertura do feixe de  $30^{\circ}$  - uma vez que possui refletor incorporado (Cavalin e Cervelin, 2007) – fornece intensidade luminosa de 3680 candelas, com potência de 90W.

O *dimmer* é um tipo de circuito que pode ser montado em um interruptor que, através da diferença de tensão permite regular a corrente que age em um circuito, interferindo no brilho das lâmpadas (Cavalin e Cervelin, 2007). Costuma ser utilizado para controlar a velocidade de ventiladores, a temperatura de chuveiros, etc.

## 5. METODOLOGIAS

Neste capítulo são apresentados os métodos para verificar os erros causados:

- (1) pela distância câmera-alvo;
- (2) pela iluminação ambiente e;
- (3) pela refletividade do alvo.

Em cada caso foram desenvolvidos experimentos em ambientes controlados, nos quais são tomados os cuidados a seguir:

- a) Estabilização da temperatura do sensor (*“warm-up time”*): foi respeitado o tempo de aquecimento do sensor, para que este registre as distâncias com maior precisão e exatidão.
- b) Controle da iluminação ambiente: os experimentos foram realizados em um ambiente totalmente escuro, ou com iluminação artificial controlada mediante uso de *dimmer* e luxímetro.
- c) Medidas para evitar multicaminho: foi garantida a ausência de objetos ou superfícies muito refletivas na área de abrangência do campo de visão da câmera.
- d) Tempo de integração e frequência de modulação conhecidos: a câmera permite configurar tais parâmetros.

### 5.1 METODOLOGIA PARA O EXPERIMENTO 1 – DISTÂNCIA CÂMERA-ALVO

Como apontado por Lindner et al. (2010), Kolb et al. (2010), Foix et al. (2011), a medição da distância usando uma câmara TOF pode ser afetada pelo erro cíclico de maneira similar àquela que ocorre nos equipamentos de medição eletrônica de distância (MED). O erro cíclico é comum em equipamentos que utilizam a diferença de fase para determinar o tempo de deslocamento entre a emissão e retorno do sinal, como aponta em Rüeger (1996). O erro cíclico é geralmente modelado como uma componente que segue uma função senoidal/cossenoidal.

Uma câmera de distância, afetada pelo erro de distância, realiza medições eivadas de parcelas de erro cíclico, conforme é visto na Equação 37.

$$R = R_0 + \Delta R \quad (37)$$

Nesta equação  $R$  é a medida de distância obtida pelo dispositivo,  $R_0$  o valor real da distância e  $\Delta R_x$  é o erro cíclico em função da distância. Através de outro dispositivo de medição com maior exatidão, assumi-se um valor como verdadeiro, de modo que o erro pode então ser observado experimentalmente, conforme a Equação 38.

$$\Delta R = R - R_0 \quad (38)$$

O erro cíclico pode ser modelado usando uma função senoidal/cossenoidal, como é a equação da onda, mostrada na Equação 39, sendo que a frequência angular  $\omega$  pode ser expressa por  $2\pi f$ , obtendo-se a Equação 40.

$$\Delta R(x) = a + A \cdot \cos(\omega \cdot x + \varphi) \quad (39)$$

$$\Delta R(x) = a + A \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f \cdot x + \varphi) \quad (40)$$

Aqui, os parâmetros a serem obtidos para a construção do modelo estão associados à função senoidal:  $\varphi$  representa a diferença de fase entre os sinais;  $A$  é a amplitude da função cíclica e;  $f$  representa a frequência do erro. O valor da constante  $a$  corresponde a uma eventual parcela constante do erro sistemático.

Durante os experimentos, notou-se que a amplitude do erro varia com a distância. Assim, procurou-se modelar a amplitude de duas maneiras: através de um função linear (Equação 41); e através de uma função exponencial com base  $e$  (número de Euler, irracional, igual a 2,718281828...), multiplicado por um fator  $c$  (Equação 42).

$$A(x) = m + n \cdot x \quad (41)$$

$$A(x) = e^{-b \cdot x} \cdot c \quad (42)$$

Desta forma, foram propostos dois modelos, mostrados nas Equações 43 e 44.

$$\Delta R(x) = a + (m + n \cdot x) \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f \cdot x + \varphi) \quad (43)$$

$$\Delta R(x) = a + (e^{-b \cdot x} \cdot c) \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f \cdot x + \varphi) \quad (44)$$

### 5.1.1 Experimento 1

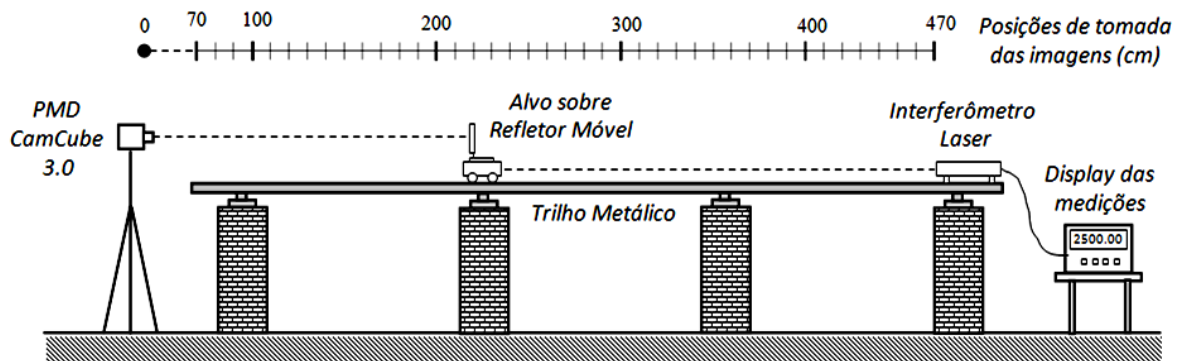
Para verificar a presença do erro cíclico, um experimento foi montado, utilizando uma barra horizontal e um interferômetro que permite medir a distância com elevada exatidão. O sensor TOF foi disposto em um extremo da barra e no outro extremo o sensor do interferômetro. Na barra foi instalado um suporte com uma placa vertical, a qual foi deslocada em distâncias entre 0,7 m e 4,7 m. Em cada posição, o valor do pixel central e sua vizinhança foi lido em imagens obtidas com diferentes tempos de integração e comparado com o valor de referência obtido com o interferômetro.

Com a câmera PMD CamCube 3.0 foram coletadas imagens de distância, intensidade e amplitude, em distâncias pré-estabelecidas, medidas por meio do interferômetro a laser com precisão de duas casas decimais além do milímetro.

A frequência de modulação do sinal infravermelho emitido foi fixada em 20 MHz. Já a amplitude do sinal infravermelho é padrão da câmera e não pode ser configurada. Utilizando o interferômetro, foram tomadas imagens em 41 posições, distantes 10 cm entre si, desde a posição inicial 70 cm, até a posição final 470 cm. Em cada uma destas posições foram tomadas imagens de distância, amplitude e intensidade, para cada tempo de integração (TI), desde TI=100μs até TI=4000 μs, variando de 100μs em 100μs.

Foi tomada uma grande quantidade de imagens para dispor de um grande número de observações (medidas de distância), possibilitando verificar a variação dos erros de forma mais detalhada, com maior resolução. Fez-se variar o Tempo de Integração para verificar a influência desta variável nos erros gerados com a câmera TOF. A Figura 34 mostra um desenho esquemático do experimento. Neste desenho podem-se observar as posições da câmera PMD Camcube 3.0 e do interferômetro, o mostrador (*display*) das medições, o alvo apoiado sobre o refletor móvel, os trilhos metálicos, e uma escala com as 41 posições para tomada de imagens.

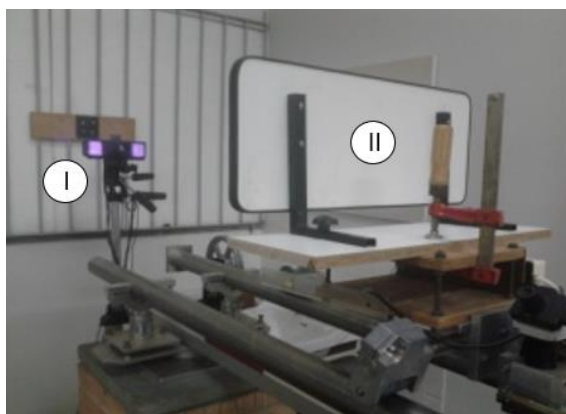
Figura 34 – Ilustração da coleta de imagens com a câmera PMD CamCube.



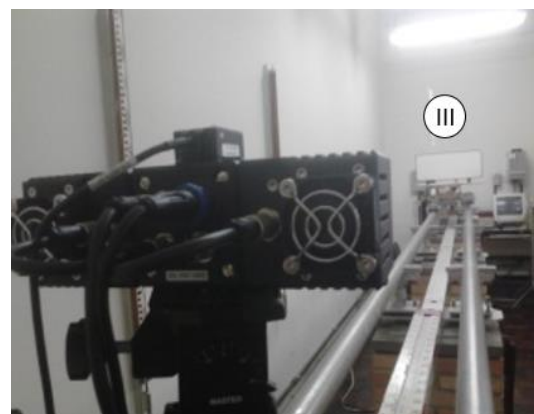
Inicialmente seria analisado apenas o pixel central das imagens. Entretanto, para não depender apenas de um valor de pixel a cada distância – pois este valor pode apresentar maiores erros em relação ao valor real – optou-se por analisar os valores dos pixels de uma janela 7 x 7 pixel no centro do alvo e a partir deles calcular uma média para cada posição.

As Figuras 35a e 35b mostram a câmara e o alvo sobre o refletor móvel do interferômetro, que é deslocado ao longo dos trilhos. O processo de medição consiste em reposicionar o alvo ao longo dos trilhos, medir a distância de referência usando o interferômetro e obter uma série de imagens para cada posição, variando o tempo de integração.

Figura 35 – Fotos do experimento: (a) I - câmara de distância sobre tripé; II - alvo sobre o refletor móvel do interferômetro; (b) III - alvo na posição mais distante.



(a)



(b)

Um dos principais erros que afetam as medidas coletadas com as câmeras deve-se à incapacidade da perfeita modulação do sinal emitido, segundo um modelo matemático

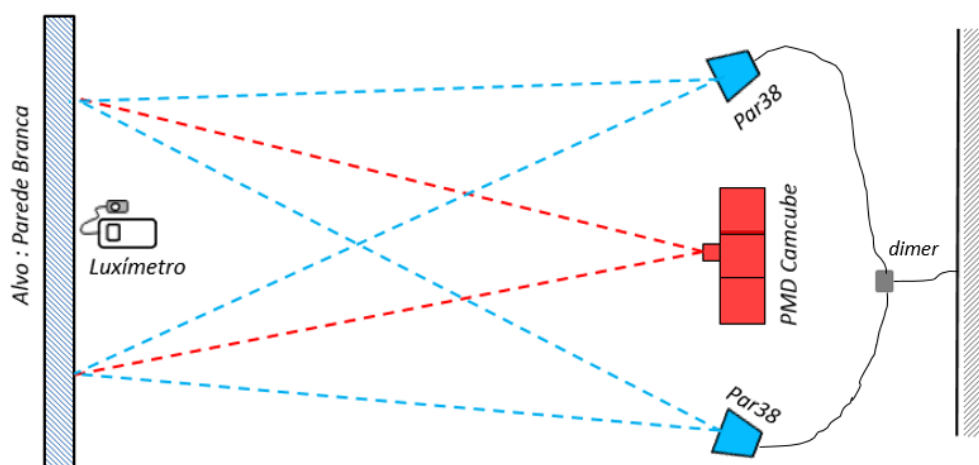
teórico – geralmente uma função senoidal – utilizado pela câmera. Isto é, devido a limitações tecnológicas e de custo, o sinal não se ajusta perfeitamente com o modelo matemático estabelecido, gerando erros nas medidas calculadas (Lindner et al., 2010; Kolb et al. 2010; Foix et al., 2011).

## 5.2 METODOLOGIA PARA O EXPERIMENTO 2 (ILUMINAÇÃO AMBIENTE)

Inicialmente foi respeitado o tempo mínimo de 40 minutos para o aquecimento do sensor, necessário para a estabilização das medições realizadas pela câmera, conforme observado em Piatti e Rinaudo (2012). Também foi verificado que a câmera não era afetada por erro de zero significativo.

A seguir, para a tomada das imagens, a câmera foi posicionada em frente ao alvo, juntamente com as duas lâmpadas posicionadas equidistantes à câmera, uma de cada lado. As lâmpadas foram instaladas na mesma altura da câmera e apontadas de modo a convergir para o centro do alvo (ver Figura 36).

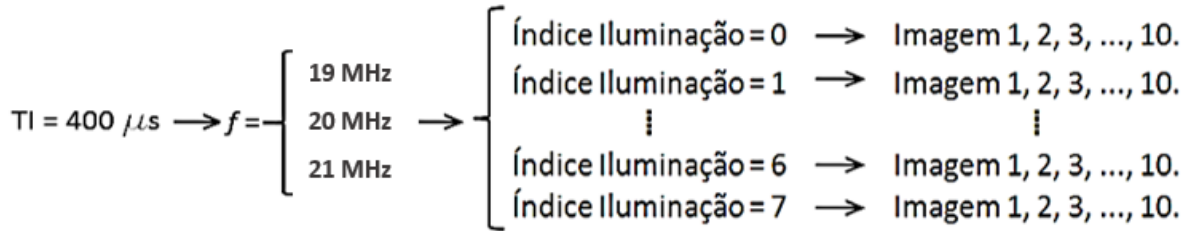
Figura 36 – Ilustração do Experimento 2, para iluminação ambiente.



Com esta disposição dos equipamentos, a câmera foi posicionada à 110 cm do alvo, configurada para emitir sinais com frequências de modulação de 19, 20 e 21 MHz, para o TI de  $400\mu s$ , uma vez que, para este TI, o erro de distância sem iluminação externa (no escuro) era o menor. Variou-se a intensidade da lâmpada em 8 índices de iluminação, desde 0 (escuro) até 7 (intensidade máxima). A tomada das imagens e os resultados foram obtidos utilizando o software Matlab®. Para cada índice foram coletadas 10 imagens de distância,

10 de intensidade e 10 de amplitude. As configurações para obtenção das imagens são mostradas na Figura 37.

Figura 37 – Configurações da coleta de imagens.



Para cada imagem de distância, intensidade e amplitude calculou-se a média e o desvio padrão dos pixels de uma janela central de 5 x 5 pixels. Para a distância subtraiu-se 110 cm da média calculada, de modo a se obter o valor do erro. Relacionou-se a variação dos erros em função da variação da intensidade e em função da amplitude.

Para verificar se as variações nos valores das distâncias foram provocadas pelas alterações na iluminação, fez-se testes estatísticos de hipótese, bilateral, em curva normal padronizada, ao nível de significância 5%, considerando as hipóteses nula e alternativa descritas a seguir:

- Hipótese Nula:  $H_0: \mu_1 = \mu_2$ , isto é, as alterações nos valores de distância não são significativas. Tais alteração se devem à flutuações características da própria amostra, dentro do desvio padrão das medidas, e não devido à mudança da iluminação ambiente.
- Hipótese Alternativa:  $H_1: \mu_1 \neq \mu_2$ , isto é, as alterações nos valores de distância são significativas. Tais alteração se devem à mudança da iluminação ambiente e não à flutuações dentro do desvio padrão das medidas da própria amostra.

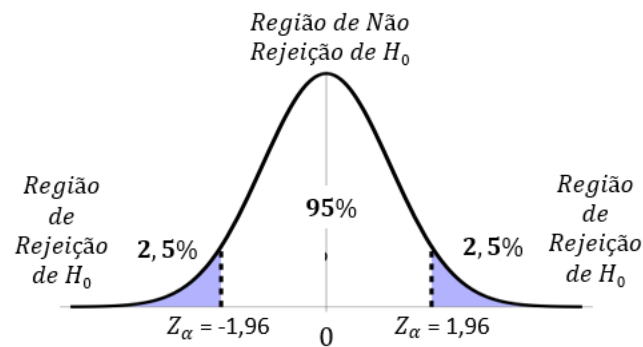
A estatística amostral Z, com amostras de 250 elementos, foi estimada pela Equação 45, a seguir :

$$Z_{calc} = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sqrt{\frac{(s_1)^2}{n_1} + \frac{(s_2)^2}{n_2}}} = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sqrt{\frac{(s_1)^2}{250} + \frac{(s_2)^2}{250}}} \quad (45)$$

Caso a hipótese nula seja rejeitada, as variações são consideradas significativas, com 95% de confiança, devendo-se às alterações na mudança na iluminação. A Figura 38 mostra

as regiões de rejeição e não rejeição da hipótese nula, onde os valores limites de  $Z$  são de  $-1,96$  e  $+1,96$ .

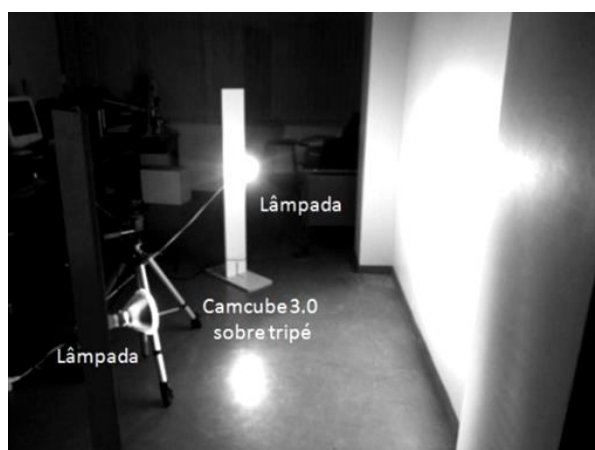
Figura 38 – Regiões de rejeição ou não rejeição de  $H_0$ , a 5% de significância:  $Z = 1,96$ .



### 5.2.1 Experimento 2

Este experimento foi realizado na Sala PI 14, bloco VI, antigo laboratório de Reprografia do Centro Politécnico da UFPR, por se tratar de um local onde foi possível garantir a não interferência da iluminação solar. Conforme pode ser visto nas Figuras 39a e 39b, além da câmera e do alvo, foram utilizadas luminárias para prover iluminação artificial, um *dimmer* para regular a intensidade da iluminação provida, e um luxímetro para medir a intensidade da iluminação que incide sobre o alvo.

Figura 39 – (a) Visão lateral do experimento; (b) Visão posterior do experimento.



(a)



(b)

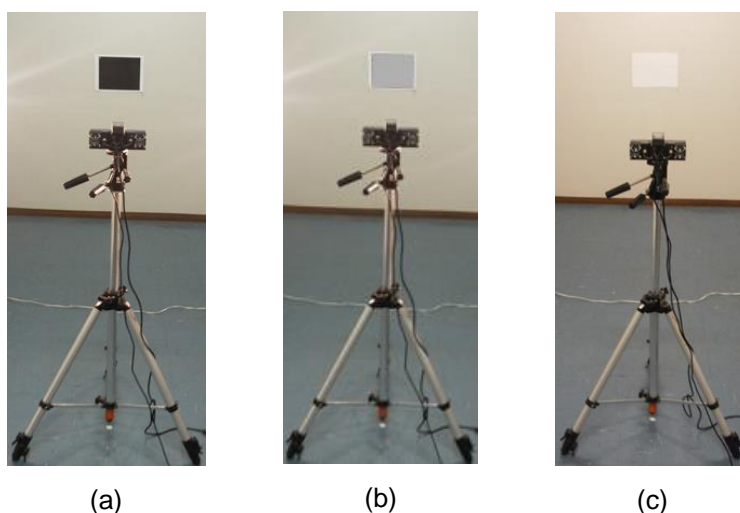


### 5.3 METODOLOGIA PARA O EXPERIMENTO 3 – REFLETIVIDADE DO ALVO

Novamente, antes de obter as imagens, foi respeitado o tempo mínimo de 40 minutos para o aquecimento do sensor, já sabendo-se que a câmera não era afetada por erro de zero significativo e que o erro de escala era desprezível.

Para este experimento foram obtidas três imagens de distância para cada uma das cores – preta, cinza ou branca (Figura 40) – em cada um dos tempos de integração, desde 100  $\mu$ s até 4000  $\mu$ s. A distância câmera-alvo foi de 3,20 m.

Figura 40 – Câmera posicionada em frente aos alvos: (a) Preto; (b) Cinza e; (c) Branco.



De posse das imagens, por meio do software Matlab, tomou-se uma janela central de 5 x 5 pixels para se obter as amostras das distâncias medidas. Com três imagens de cada tempo de integração em cada uma das cores, tem-se amostras de 75 elementos, isto é, 75 valores de distância. Para cada amostra – de cada TI em cada cor – calculou-se a média e o desvio padrão.

Para verificar se as variações nos valores das distâncias deveram-se às alterações do TI e da refletividade do alvo, fez-se testes estatísticos de hipótese, bilateral, em curva normal padronizada, ao nível de significância 5%, considerando as hipóteses nula e alternativa descritas a seguir:

- Hipótese Nula:  $H_0: \mu_1 = \mu_2$ , isto é, as alterações nos valores de distância não são significativas. Tais alteração se devem à flutuações características da própria

amostra, dentro do desvio padrão das medidas e não devido à mudança da reflectância do alvo ou à mudança do tempo de integração

- Hipótese Alternativa:  $H_1: \mu_1 \neq \mu_2$ , isto é, as alterações nos valores de distância são significativas. Tais alteração se devem à mudança da reflectância do alvo ou à mudança do tempo de integração e não à flutuações características da própria amostra, dentro do desvio padrão das medidas.

A estatística teste, com amostras de 75 elementos, é dada pela Equação 46, a seguir:

$$Z_{calc} = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sqrt{\frac{(s_1)^2}{n_1} + \frac{(s_2)^2}{n_2}}} = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sqrt{\frac{(s_1)^2}{75} + \frac{(s_2)^2}{75}}} \quad (46)$$

Caso a hipótese nula seja rejeitada, as variações são consideradas significativas, com 95% de confiança, devendo-se às alterações de reflectância do alvo ou à alteração do tempo de integração.

## 6. RESULTADOS

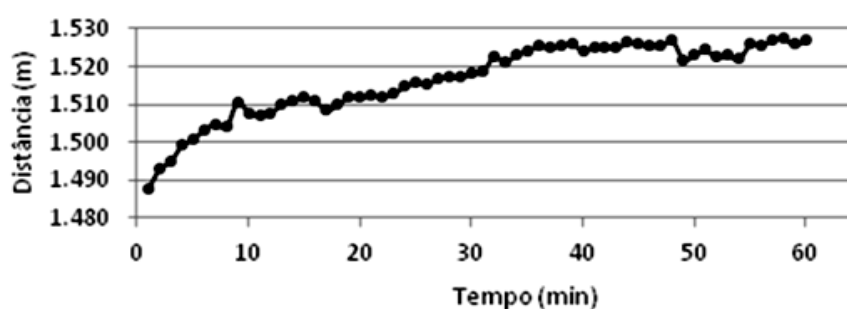
A seguir são mostrados resultados obtidos por meio da reprodução dos experimentos descritos anteriormente. Inicialmente são mostrados resultados quanto ao tempo de aquecimento da câmera, seguindo-se dos resultados dos experimentos do erro devido à distância câmera-alvo, do erro devido à iluminação ambiente e, por fim, do erro devido à refletividade do alvo.

### 6.1 RESULTADOS PARA O TEMPO DE AQUECIMENTO

Inicialmente foi realizado um experimento para avaliar o tempo necessário de pré-aquecimento do sensor da câmera. Verificando a variação dos valores da distância em função do tempo de inicialização, é possível determinar o tempo necessário para atingir a estabilização da temperatura do sensor. Para isso, a câmera foi posicionada na frente do alvo e foram monitorados os valores de distância e o desvio padrão da região central da imagem ao longo de uma hora.

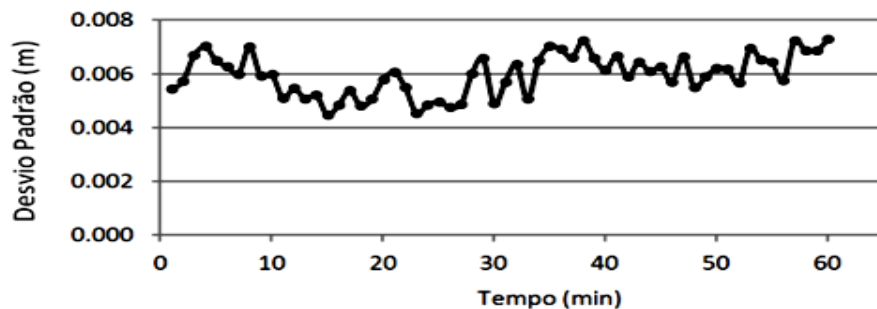
Nota-se na Figura 41, que os valores iniciais da distância são pequenos e eles crescem na medida em que o tempo passa, ou seja, o sensor se aquece. Após 40 minutos, o sensor atinge um estado estável e as medidas de distância não sofrem variações significativas.

Figura 41 – Variação da distância média ao longo do tempo.



O mesmo não ocorre com o desvio padrão, o qual se mantém estável ao longo do período de análise, como pode ser visto na Figura 42. Isto indica que a temperatura do sensor não afeta a precisão das medidas, mas sim sua exatidão, gerando estimativas menores que o valor real quando o sensor não está aquecido. Tais resultados concordam com os de Piatti e Rinaudo (2012).

Figura 42 – Variação do desvio padrão de distância ao longo do tempo.



A câmera foi ligada por aproximadamente 50 minutos, de modo que o sensor atingisse uma temperatura tal que permitisse a estabilidade das medições. Feito isso, iniciou-se a tomada das imagens e a obtenção da distância média da janela central 7x7 pixels.

O erro de zero foi nulo para os tempos de integração desde 600  $\mu$ s até 4000  $\mu$ s. Assim, a média amostral e o desvio padrão amostral também foram nulos (zero). Realizando um teste estatístico para testar a média populacional, com a curva Z (35 amostras), considerando como hipótese nula ( $H_0$ ) de que a média do erro de zero é nulo ( $\mu = 0$ ) para tais tempos de integração, não foi possível rejeitar  $H_0$ . Assim, desprezou-se o erro de zero.

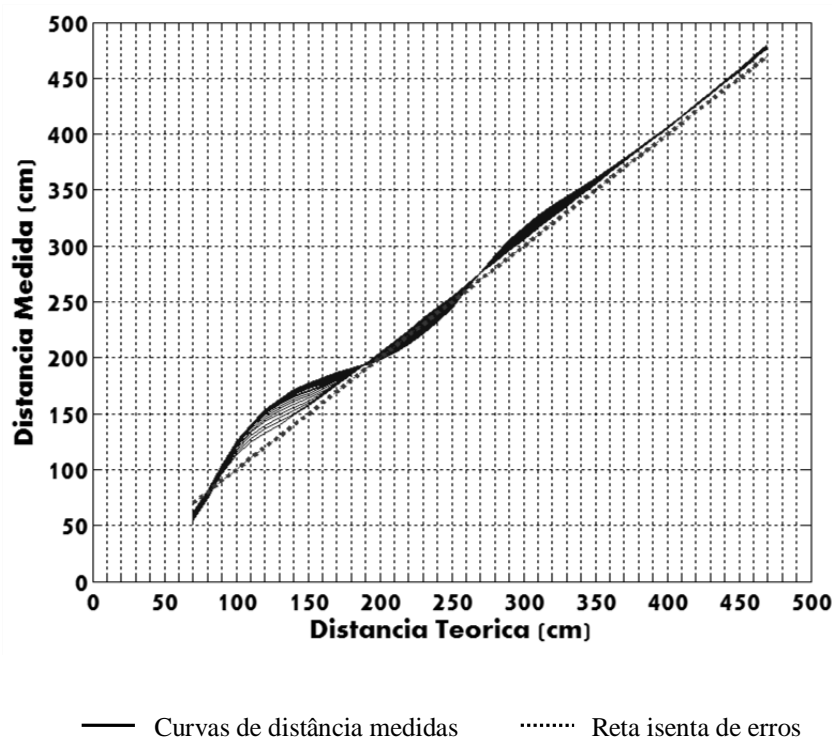
O erro de escala, por sua vez, foi desprezado por dois motivos: (1) as medições são consideradas apenas dentro do intervalo de meio comprimento de onda (7,5 m), de modo que a alteração da frequência tem efeito em apenas um ciclo; (2) seria necessário que houvesse um erro da ordem de 2800 ppm na emissão da frequência para que gerasse um erro de 0,14 mm na medição e, frente a precisão da câmara, este valor pode ser desprezado.

## 6.2 RESULTADOS DO EXPERIMENTO 1 - DISTÂNCIA CÂMERA-ALVO

De posse das imagens, fez-se um programa no MatLab para capturar os pixels desta janela 7 x 7 pixels do centro do alvo da imagem para calcular a média aritmética e o desvio padrão destes pixels. A média e o desvio padrão tomados nestes 49 (quarenta e nove) pixels são uma forma de se obter um valor de distância mais confiável. Isto pode ser confirmado analisando o desvio padrão a cada distância do alvo, pois quanto menor o desvio padrão, mais confiável é a medida. Desvio padrão alto pode indicar que algum pixel na janela apresentou um valor de distância discrepante.

A Figura 43 mostra um gráfico que relaciona a distância de referência – isto é, a distância obtida pelo interferômetro e assumida como verdadeira – com a distância média obtida pela câmera, para todos os tempos de integração considerados. A reta pontilhada com inclinação de  $45^\circ$  (quarenta e cinco graus) representa a condição ideal, teoricamente isenta de erros.

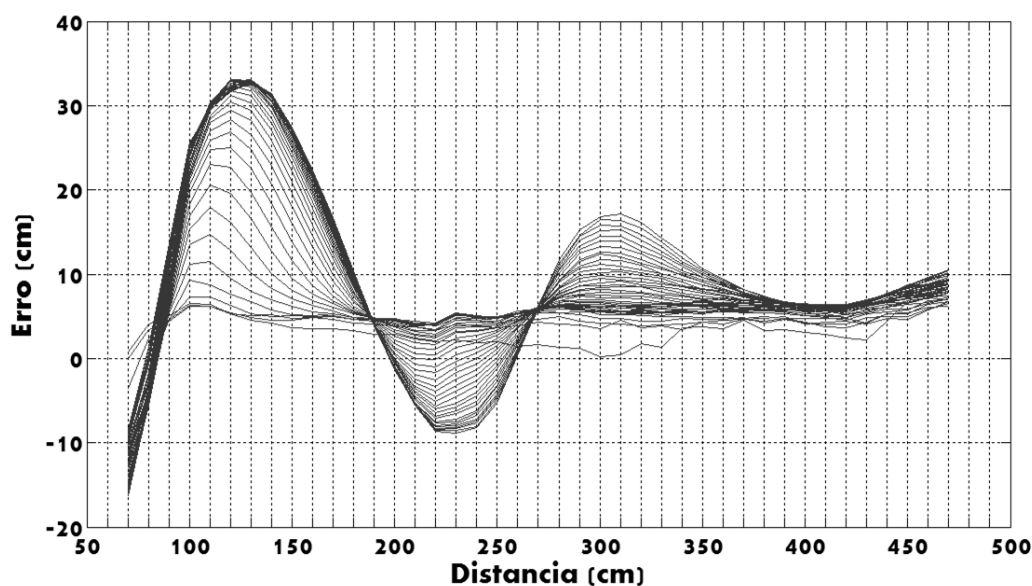
Figura 43 – Gráfico relacionando a distância medida e a distância teórica, para todos os tempos de integração (TI), desde  $TI=100\mu s$  até  $TI=4000\mu s$ , variando a cada  $100\mu s$ .



Com os erros existentes nas medidas realizadas, observa-se que quanto maior o tempo de integração, maiores são os erros associados. Apesar disso, três distâncias se destacam: 80 cm, 190 cm e 270 cm. Nestas distâncias os erros foram os menores para todos os tempos de integração verificados. Na posição 190 cm, por exemplo, o erro médio para todos os tempos de integração é de 4,247 cm, com desvio padrão de 0,357 cm.

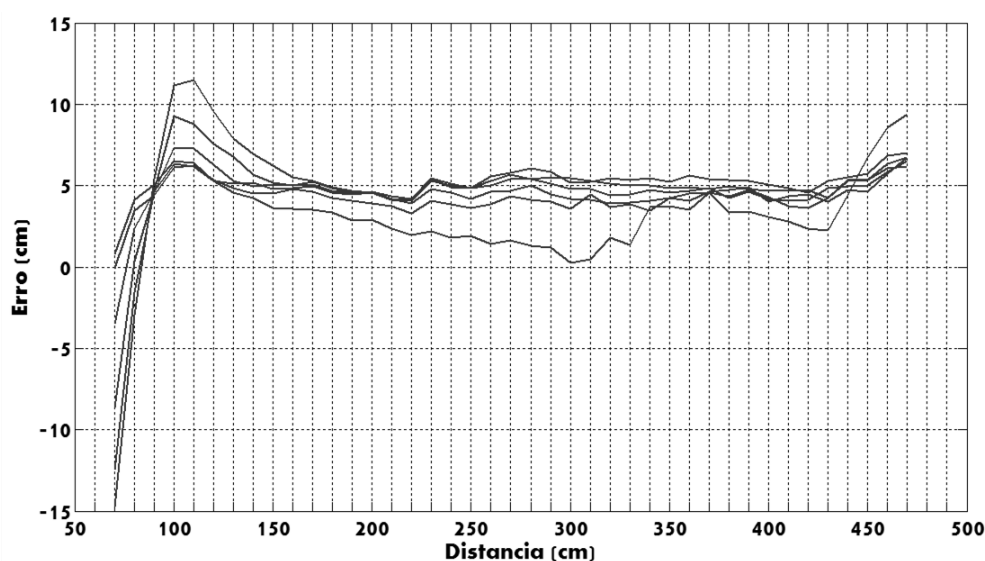
Na Figura 44 tem-se um gráfico que relaciona o erro e distância teórica. Pode-se ver mais claramente o comportamento cíclico nas distâncias calculadas onde, para todos os tempos de integração verificados, há uma mesma frequência, mas com amplitudes variáveis que aumentam conforme se aumenta o tempo de integração. A curva com menores amplitudes refere-se ao tempo de integração  $100\mu s$  e a curva com maiores amplitudes refere-se ao tempo de integração  $4000\mu s$ , logo a amplitude do erro é diretamente proporcional ao tempo de integração.

Figura 44 – Gráfico relacionando o erro de distância e a distância teórica, para os tempos de integração (TI), desde  $TI=100\mu s$  até  $TI=4000\mu s$ , variando a cada  $100\mu s$ .



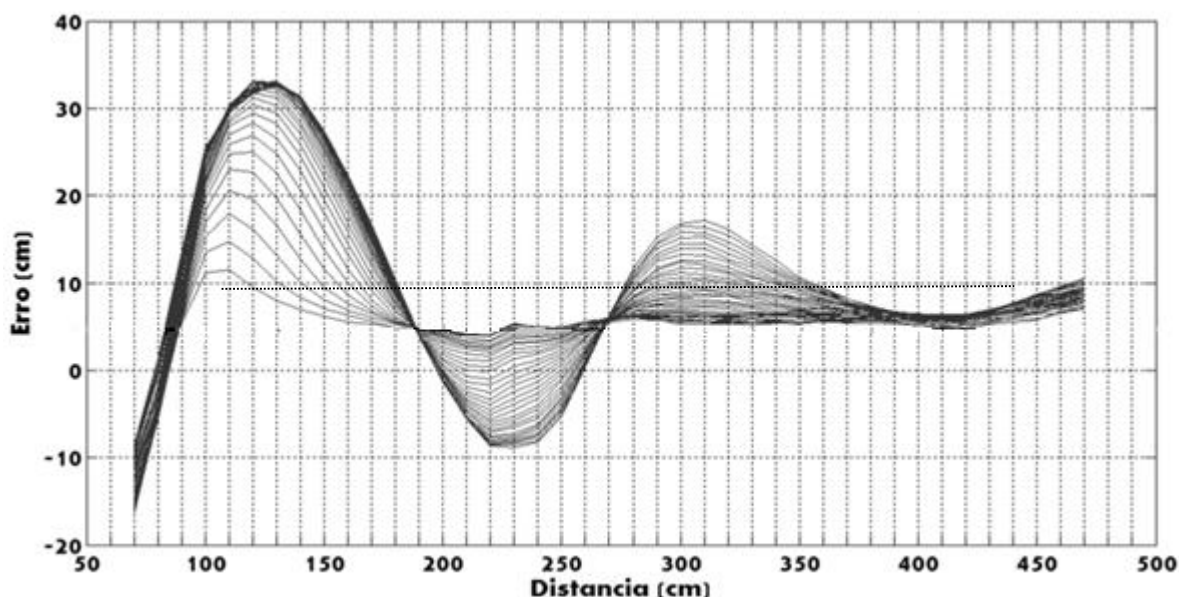
A relação entre amplitude do erro e o tempo de integração só não se verifica claramente para os tempos de integração menores que  $600\mu s$ . A Figura 45 mostra as curvas com tempo de integração entre  $100\mu s$  e  $500\mu s$ , em que a exposição à iluminação foi muito baixa.

Figura 45 – Gráfico relacionando o erro de distância e a distância teórica, para  $TI=100\mu s$  até  $TI=500\mu s$ , variando a cada  $100\mu s$ .



Na Figura 46 foram excluídas estas curvas referentes aos tempos de integração menores que  $600\mu s$ . Pode-se observar mais claramente que se trata de um erro cíclico. A correção deste erro cíclico fará com as amplitudes dos erros recaiam sobre uma linha horizontal distante 5 cm acima do eixo x. Assim, há um erro constante de 5 cm positivo para todos os tempos de integração. Este valor de 5 cm é a constante da equação de compensação do erro na distância, e é decorrente da impossibilidade de se determinar o centro de projeção do sensor.

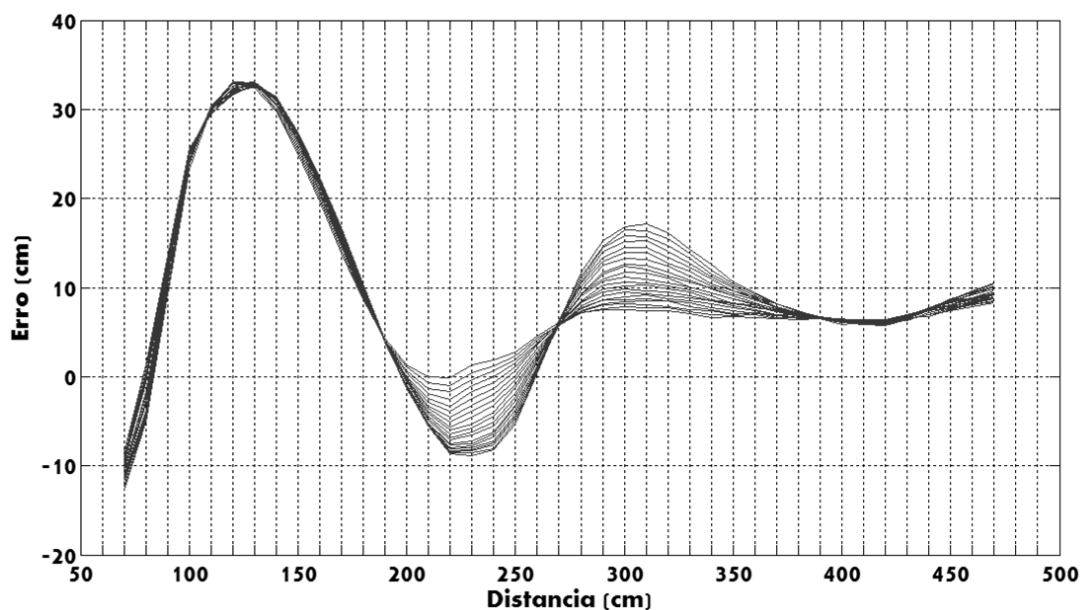
Figura 46 – Gráfico relacionando o erro de distância e a distância teórica, para  $T_I=600\mu s$  até  $T_I=4000\mu s$ , variando a cada  $100\mu s$ .



Outro fato observado, como mostra a Figura 47, é que para os tempos de integração no intervalo entre  $2000\mu s$  e  $4000\mu s$ , entre as distâncias 70 cm e 190 cm, as amplitudes dos erros apresentam valores similares. Desta forma, verifica-se que neste intervalo de distâncias podem-se corrigir os erros cíclicos com uma mesma função, qualquer que seja o tempo de integração entre  $2000\mu s$  e  $4000\mu s$ . A partir do tempo de integração  $2000\mu s$ , há distâncias calculadas menores que as distâncias teóricas (abaixo do eixo x).

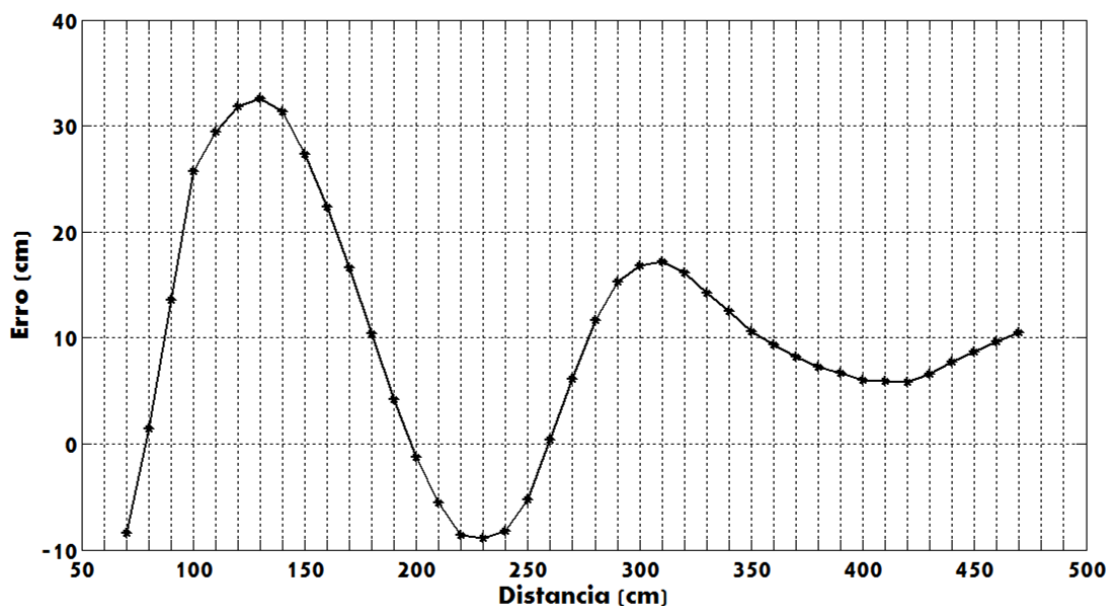
Para modelar o erro cíclico para todas as distâncias observadas, deve-se fazer isso para cada tempo de integração utilizado.

Figura 47 – Gráfico relacionando o erro de distância e a distância teórica, para  $T_I=2000\mu s$  até  $T_I=4000\mu s$ , a cada  $100\mu s$ .



A título de demonstração da modelagem ou compensação do erro cíclico, escolheu-se o tempo de integração  $4000\mu s$ , cujo gráfico é mostrado na Figura 48.

Figura 48 – Gráfico relacionando o erro de distância e a distância teórica, para  $T_I=4000\mu s$ .





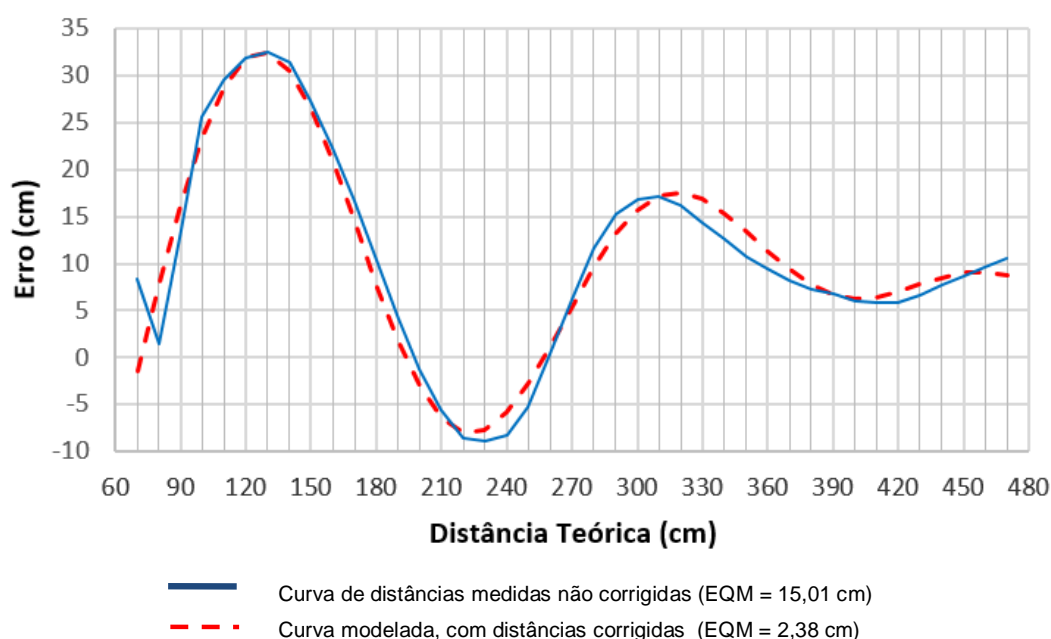
Com os dados referentes ao tempo de integração 4000 $\mu$ s, fez-se o ajustamento das observações, pelo método paramétrico, não linear (com iteração), para os dois modelos matemáticos propostos na metodologia.

Para o primeiro modelo proposto, com amplitude representada por uma função linear, obteve-se os seguintes valores de parâmetros:  $a = 8,4601$  cm ;  $m = 34,0462$  cm ;  $n = -0,0775$ ;  $f = 0,0051$  Hz e ;  $\varphi = 2,1159$  rad. Assim, tem-se a função de modelagem mostrada na Equação 47, a seguir.

$$\Delta R(x) = 8,4601 + (34,0462 - 0,0775 \cdot x) \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot 0,0051 \cdot x + 2,1159) \quad (47)$$

A Figura 49 mostra a curva gerada pelo primeiro modelo proposto (linha tracejada) sobre a curva original dos erros (linha cheia).

Figura 49 – Gráfico para o 1º modelo, com amplitude como uma função linear. Em linha cheia, tem-se a curva original dos erros. Em linha tracejada, a curva obtida com o modelo de correção.



A Tabela 1 mostra os erros e as distâncias corrigidas em cada posição do experimento. O erro quadrático médio (EQM), antes da modelagem, era de 15,01 cm. Após a modelagem, o erro quadrático médio diminuiu para 2,38 cm, que representa 84,14 % de redução do erro.

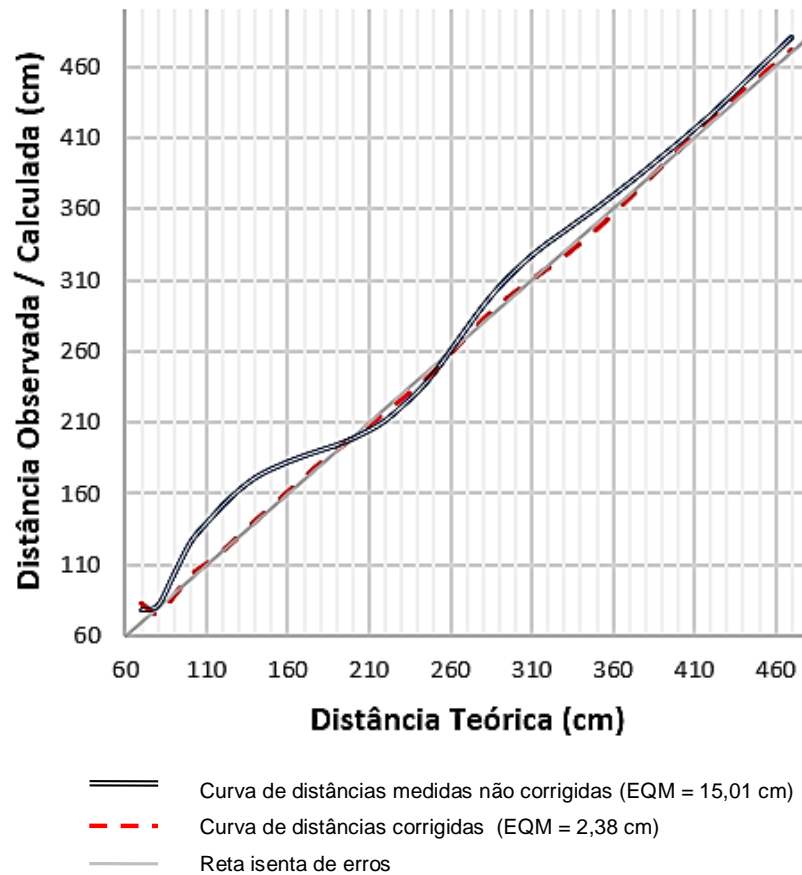
Tabela 1 – Erros corrigidos e distâncias corrigidas com o primeiro modelo, cuja amplitude varia linearmente.

Posições (cm)	Distância não corrigida (cm)	Erro não corrigido (cm)	Distância corrigida (cm)	Erro corrigido (cm)	Posições (cm)	Distância não corrigida (cm)	Erro não corrigido (cm)	Distância corrigida (cm)	Erro corrigido (cm)
70	61,5626	8,4374	79,8826	9,8826	280	291,6651	11,6651	282,0620	2,0620
80	81,4507	1,4507	73,9079	-6,0921	290	305,2906	15,2906	292,1846	2,1846
90	103,5849	13,5849	87,4488	-2,5512	300	316,7949	16,7949	301,1062	1,1062
100	125,6878	25,6878	102,2080	2,2080	310	327,1956	17,1956	310,0228	0,0228
110	139,4539	29,4539	110,5603	0,5603	320	336,1392	16,1392	318,6105	-1,3895
120	151,8321	31,8321	119,8975	-0,1025	330	344,2725	14,2725	327,4064	-2,5936
130	162,5681	32,5681	130,1368	0,1368	340	352,5480	12,548	337,1398	-2,8602
140	171,3558	31,3558	140,8691	0,8691	350	360,6365	10,6365	347,1836	-2,8164
150	177,3518	27,3518	150,8991	0,8991	360	369,3949	9,3949	358,0675	-1,9325
160	182,3309	22,3309	161,4526	1,4526	370	378,1828	8,1828	368,8410	-1,1590
170	186,6435	16,6435	172,2040	2,2040	380	387,2729	7,2729	379,5248	-0,4752
180	190,3962	10,3962	182,5365	2,5365	390	396,7141	6,7141	390,0049	0,0049
190	194,1717	4,1717	192,3427	2,3427	400	406,0154	6,0154	399,7329	-0,2671
200	198,7241	-1,2759	201,7921	1,7921	410	415,8948	5,8948	409,4759	-0,5241
210	204,4009	-5,5991	210,8098	0,8098	420	425,7797	5,7797	418,8025	-1,1975
220	211,3562	-8,6438	219,3248	-0,6752	430	436,5875	6,5875	428,8360	-1,1640
230	221,1387	-8,8613	228,8693	-1,1307	440	447,7785	7,7785	439,2714	-0,7286
240	231,7718	-8,2282	237,6460	-2,3540	450	458,6662	8,6662	449,6454	-0,3546
250	244,7184	-5,2816	247,4588	-2,5412	460	469,6610	9,661	460,5433	0,5433
260	260,3577	0,3577	259,1393	-0,8607	470	480,4938	10,4938	471,7913	1,7913
270	276,0926	6,0926	270,5948	0,5948					

$$EQM_{\text{não-corrigido}} = 15,01 \text{ cm} \quad \text{—————} \quad EQM_{\text{corrigido}} = 2,38 \text{ cm}$$

Na Figura 50, verifica-se a redução dos erros através do primeiro modelo proposto. A linha cheia mais clara, a 45°, representa a reta ideal isenta de erros. Em linha cheia, tem-se a curva mais sinuosa representando os valores das distâncias obtidas pela câmera, sem qualquer correção. Já em linha tracejada, próxima à reta isenta de erros, está a curva representativa dos erros corrigidos pelo primeiro modelo proposto, com amplitude como função linear da distância.

Figura 50 – Gráfico relacionando a distância observada ou a distância calculada e a distância teórica, com o primeiro modelo cuja amplitude varia linearmente.

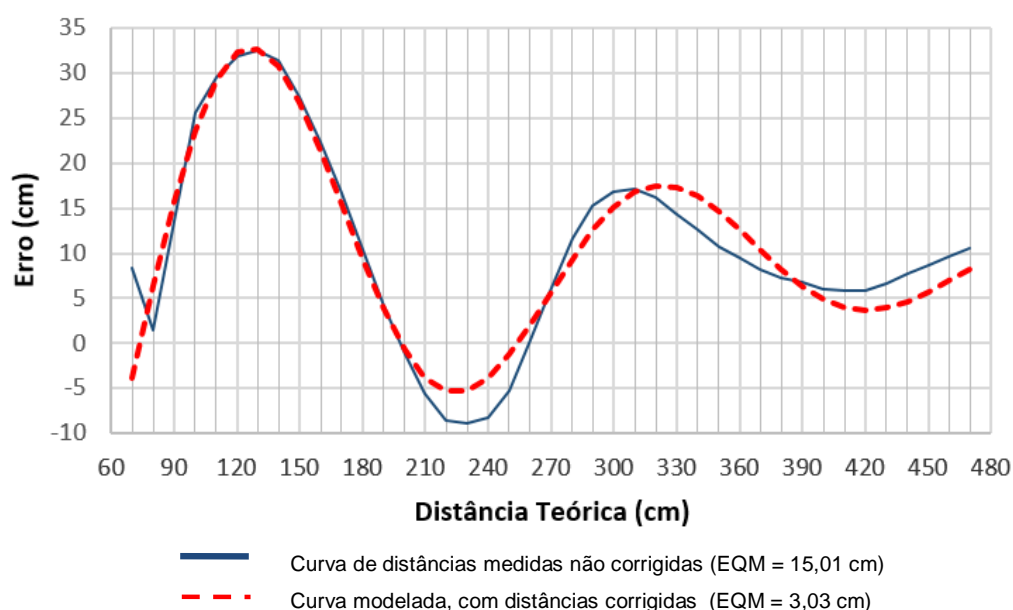


Já para o segundo modelo proposto, com amplitude representada por uma função exponencial de base  $e$ , obteve-se os seguintes valores de parâmetros:  $a = 8,8961$  cm;  $b = 0,0052$  ;  $c = 46,9134$  cm ;  $f = 0,0051$  Hz e ;  $\varphi = 2,0650$  rad. Assim, tem-se a função de modelagem mostrada na Equação 48, a seguir.

$$\Delta R(x) = 8,8961 + e^{-0,0052 \cdot x} \cdot 46,9134 \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot 0,0051 \cdot x + 2,0650) \quad (48)$$

A Figura 51 mostra a curva gerada pelo segundo modelo proposto (linha tracejada) sobre a curva original dos erros (linha cheia).

Figura 51 – Gráfico para o 2º modelo, com amplitude como função exponencial de base e. Em linha cheia, tem-se a curva original dos erros. Em linha tracejada, a curva obtida com o modelo de correção.



A Tabela 2 mostra os erros e as distâncias corrigidas em cada posição do experimento. O erro quadrático médio (EQM) antes da modelagem era de 15,01 cm. Após a modelagem, o erro quadrático médio diminuiu para 3,03 cm, que representa 79,81 % de redução do erro.

Tabela 2 – Erros corrigidos e distâncias corrigidas com o segundo modelo, cuja amplitude é função exponencial de base e.

Posições (cm)	Distância não corrigida (cm)	Erro não corrigido (cm)	Distância corrigida (cm)	Erro corrigido (cm)
70	61,5626	8,4374	82,3650	12,36497
80	81,4507	1,4507	75,1465	-4,85348
90	103,5849	13,5849	87,8024	-2,19756
100	125,6878	25,6878	102,0465	2,046514
110	139,4539	29,4539	110,1930	0,19301
120	151,8321	31,8321	119,5272	-0,4728
130	162,5681	32,5681	129,8424	-0,15759
140	171,3558	31,3558	140,6152	0,61517
150	177,3518	27,3518	150,5675	0,567495
160	182,3309	22,3309	160,8869	0,886941
170	186,6435	16,6435	171,2574	1,257352
180	190,3962	10,3962	181,1134	1,113424

Posições (cm)	Distância não corrigida (cm)	Erro não corrigido (cm)	Distância corrigida (cm)	Erro corrigido (cm)
280	291,6651	11,6651	282,3117	2,311741
290	305,2906	15,2906	292,7144	2,714425
300	316,7949	16,7949	301,6794	1,679366
310	327,1956	17,1956	310,4086	0,408602
320	336,1392	16,1392	318,6287	-1,37126
330	344,2725	14,2725	326,9647	-3,03527
340	352,5480	12,548	336,2575	-3,74252
350	360,6365	10,6365	345,9964	-4,00361
360	369,3949	9,3949	356,8121	-3,18791
370	378,1828	8,1828	367,8199	-2,18014
380	387,2729	7,2729	379,0561	-0,9439
390	396,7141	6,7141	390,3641	0,364056

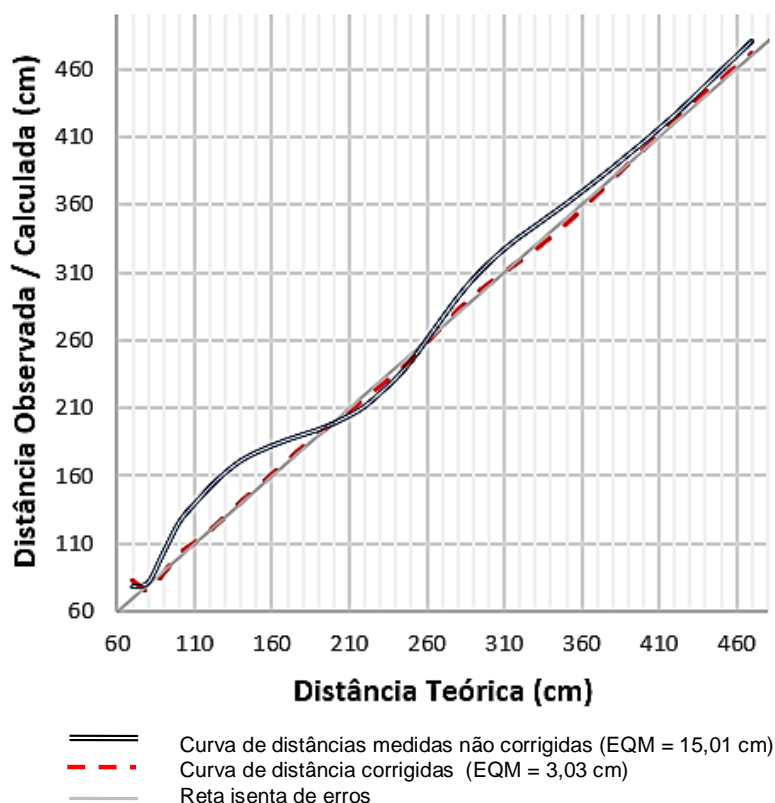
190	194,1717	4,1717	190,4278	0,427803
200	198,7241	-1,2759	199,4608	-0,5392
210	204,4009	-5,5991	208,2199	-1,78011
220	211,3562	-8,6438	216,6915	-3,30852
230	221,1387	-8,8613	226,4285	-3,57149
240	231,7718	-8,2282	235,6132	-4,38684
250	244,7184	-5,2816	245,9906	-4,00939
260	260,3577	0,3577	258,3057	-1,69434
270	276,0926	6,0926	270,3656	0,365618

400	406,0154	6,0154	401,0951	1,095113
410	415,8948	5,8948	411,8686	1,86858
420	425,7797	5,7797	422,0761	2,076063
430	436,5875	6,5875	432,6594	2,659404
440	447,7785	7,7785	443,1552	3,155208
450	458,6662	8,6662	452,9924	2,992447
460	469,6610	9,661	462,7208	2,720834
470	480,4938	10,4938	472,2182	2,21825

EQM<sub>não-corrigido</sub> = 15,01 cm ——— EQM<sub>corrigido</sub> = 3,03 cm

Na Figura 52, verifica-se a redução dos erros através do segundo modelo proposto. A linha cheia, mais clara, a 45°, representa a reta ideal isenta de erros. Em linha dupla, tem-se a curva mais sinuosa representando os valores das distâncias obtidas pela câmera, sem qualquer correção. Já em linha tracejada, próxima à reta isenta de erros, está a curva representativa dos erros corrigidos pelo segundo modelo proposto, com amplitude como função exponencial de base e. A pequena diferença entre o EQM obtido com o primeiro modelo e com o segundo modelo, reflete-se na semelhança entre as Figuras 50 e 52.

Figura 52 – Gráfico relacionando a distância observada ou a distância calculada e a distância teórica, com o primeiro modelo cuja amplitude varia linearmente.



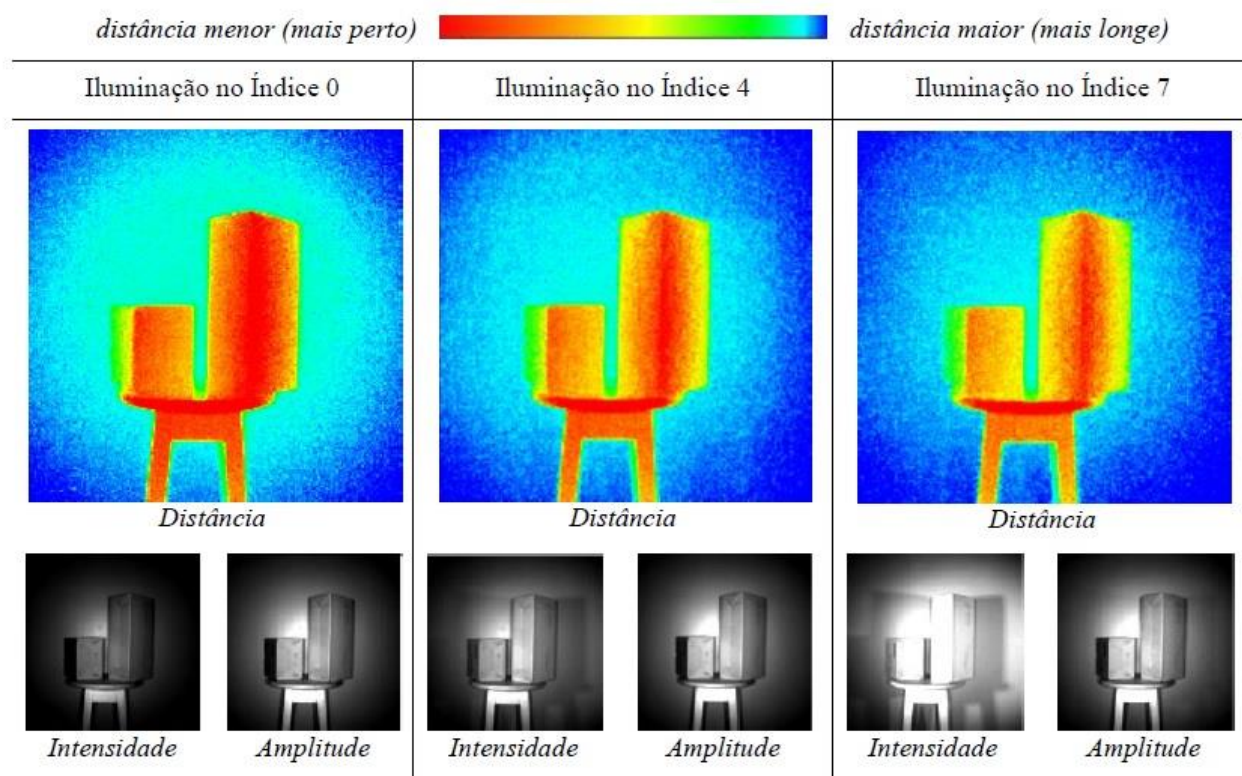
Verificou-se que as equações de modelagem propostas obtiveram bons resultados, haja visto que, para os dois modelos, houve considerável redução nos valores dos erros, representados pelo Erro Quadrático Médio.

### 6.3 RESULTADOS DO EXPERIMENTO 2 - ILUMINAÇÃO AMBIENTE

Assim como a alteração do tempo de integração causa alterações nas imagens de distância, intensidade e amplitude, o mesmo ocorre com a alteração da iluminação externa presente na cena.

A título de ilustração, a Figura 53 mostra esta alteração, onde se observam imagens de duas caixas sobre um banco, em três situações: com iluminação no índice 0, iluminância de  $4,1 \text{ W/m}^2$ ; com iluminação no índice 4, iluminância de  $108,9 \text{ W/m}^2$ ; e com iluminação no índice 7, iluminância de  $170,5 \text{ W/m}^2$ . Os valores de iluminância fornecida pelos índices foram medidos com o luxímetro.

Figura 53 – Imagens de distância, intensidade e amplitude para diferentes iluminações: Iluminação Índice 0, Iluminação Índice 4, e Iluminação Índice 7.

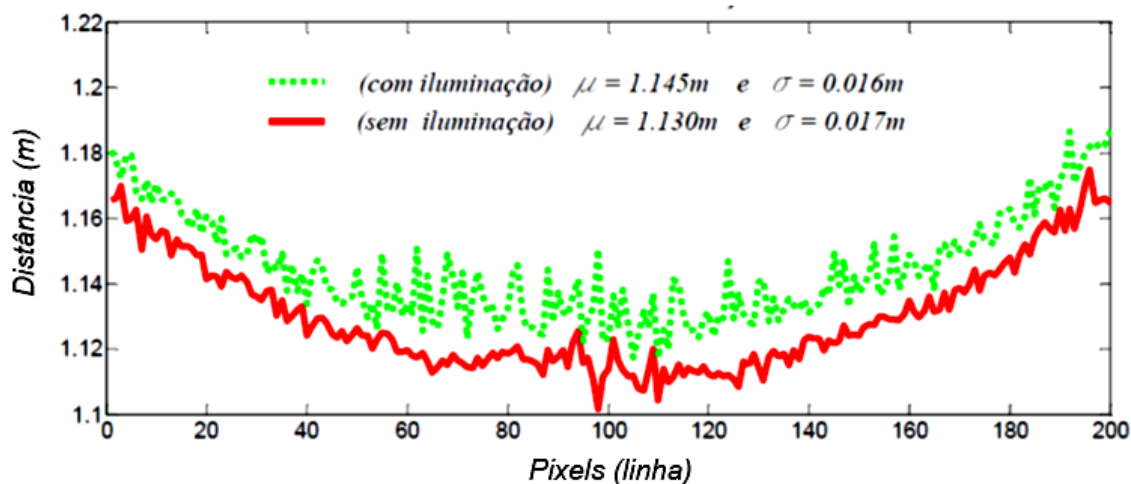


Pelas cores hipsométricas percebe-se que, com a incidência de iluminação externa na cena, as distâncias medidas entre a câmera e os objetos se tornaram maiores, sendo observado mais facilmente na parede ao fundo e nas extremidades das caixas.

Verifica-se que a imagem de intensidade é mais sensível à iluminação externa do que a imagem de amplitude. Tal verificação é entendida pelas Equações 7 e 8, de amplitude e intensidade, respectivamente, onde a amplitude é calculada se utilizando de diminuições de valores da função de correlação em instantes distintos, havendo uma normalização dos valores. O mesmo não ocorre no cálculo da intensidade.

Visando mostrar o afastamento da imagem causado pela incidência da iluminação, tem-se a Figura 54, onde há a representação da linha central de duas imagens, com frequência de modulação de 20 MHz: a linha cheia, em vermelho, é a linha central da imagem no escuro; a linha pontilhada, em verde, é a linha central da imagem iluminada no índice 7. O alvo é uma parede branca.

Figura 54 – Representação da linha central de duas imagens de distância. Observa-se o afastamento devido à iluminação ambiente.

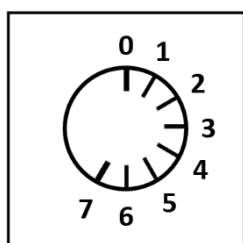


Observou-se um afastamento da imagem, cuja distância média aumentou de 1,130m para 1,145m. O desvio padrão calculado apresenta pouca alteração – de 0,017m para 0,016m – pois a iluminação era focada no centro do alvo e o cálculo foi feito para a linha inteira, ao longo de toda a imagem. É possível observar que a linha com iluminação apresenta maior variação nos valores de distância, representando o ruído na imagem devido

à iluminação ambiente. Portanto, apesar da câmera PMD Camcube 3.0 possuir o dispositivo SBI, o mesmo não impediu que a iluminação ambiente interferisse nos valores de distância.

Posteriormente, verificou-se que o *dimmer*, através do giro do seu botão, alterava a iluminação à taxas não constantes. Assim, a divisão do arco de giro do botão em sete espaçamentos (ver Figura 55a), não garantia que a variação da iluminação fornecida fosse constante. Com auxílio do luxímetro, verificou-se qual a iluminância fornecida em cada um dos índices, como mostrado na Figura 55b.

Figura 55 – (a) Representação do *dimmer*, com o seu botão marcado nas posições dos índices de iluminação; (b) Iluminância de cada índice de iluminação, em  $\text{W/m}^2$ .



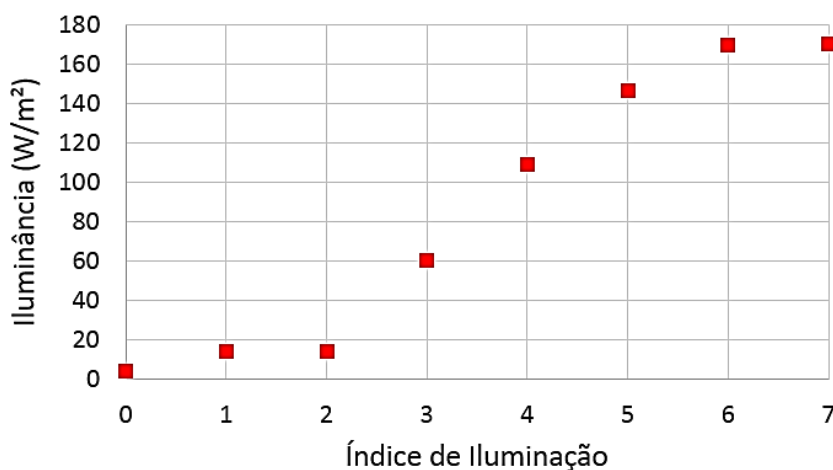
(a)

Índice de Iluminação	0	1	2	3	4	5	6	7
Iluminância ( $\text{W/m}^2$ )	4,1	14,0	14,4	60,3	108,9	146,4	169,4	170,5

(b)

A Figura 56 mostra um gráfico relacionando o índice de iluminação do dimmer e sua respectiva iluminância, em  $\text{W/m}^2$ .

Figura 56 – Gráfico relacionado a iluminância e o índice de Iluminação.



A Tabela 2 mostra os valores de média e desvio padrão dos erros, para cada índice de iluminação, de 0 a 7, em cada uma das frequências de modulação do sinal, 19, 20 e 21 MHz.



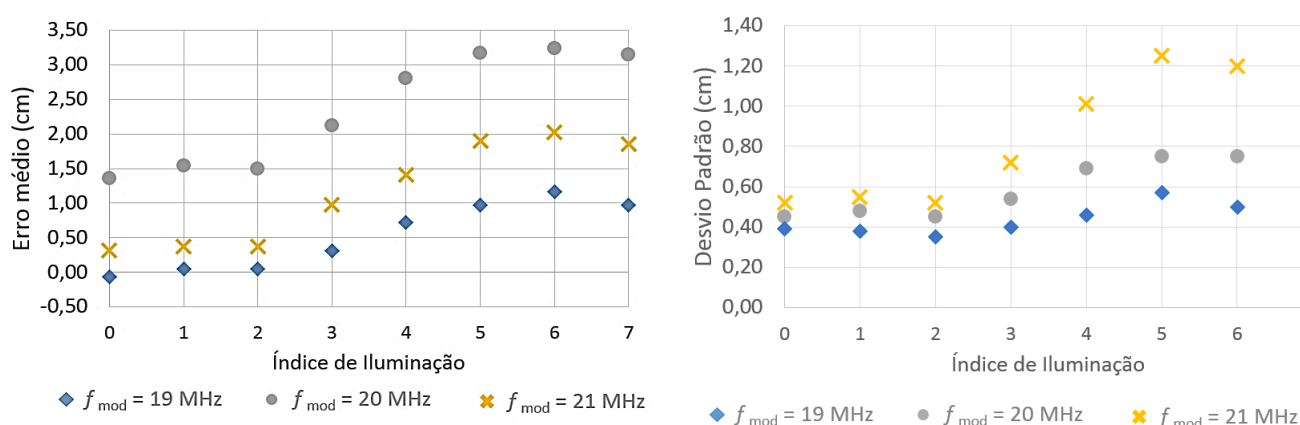
As Figuras 57a e 57b mostram os respectivos gráficos para o erro médio e o desvio padrão médio, respectivamente.

Tabela 2 - Média e desvio padrão dos erros em cada Índice de Iluminação, para as frequências de modulação 19, 20 e 21 MHz.

Índice de Iluminação	$f_{\text{mod}} = 19 \text{ MHz}$		$f_{\text{mod}} = 20 \text{ MHz}$		$f_{\text{mod}} = 21 \text{ MHz}$	
	Média (cm)	Desvio Padrão (cm)	Média (cm)	Desvio Padrão (cm)	Média (cm)	Desvio Padrão (cm)
0	-0,07	0,39	1,36	0,45	0,32	0,52
1	0,05	0,38	1,54	0,48	0,37	0,55
2	0,05	0,35	1,49	0,45	0,37	0,52
3	0,31	0,40	2,12	0,54	0,98	0,72
4	0,72	0,46	2,80	0,69	1,41	1,01
5	0,97	0,57	3,17	0,75	1,90	1,25
6	1,16	0,50	3,24	0,75	2,03	1,20
7	0,97	0,58	3,15	0,76	1,85	1,26

Observa-se que as curvas da Figura 57a e da Figura 56 apresentam o mesmo comportamento – apesar dos valores diferentes – de modo que a relação entre a variação de iluminância e a variação do erro é constante.

Figura 57 – (a) Gráfico relacionando o erro médio de distância e o índice de Iluminação; (b) gráfico relacionando o desvio padrão do erro de distância e o índice de Iluminação.



A Tabela 3 mostra o resultado para os testes de hipótese realizados para verificar se a mudança na iluminação alterou significativamente os valores de distância. Observa-se que as mudanças de iluminação do índice 2 para 3 (14,4 para 60,3 W/m<sup>2</sup>; variação de 45,9 W/m<sup>2</sup>),

de 3 para 4 (60,3 para 108,9 W/m<sup>2</sup>; variação de 48,6 W/m<sup>2</sup>), e de 4 para 5 (de 108,9 W/m<sup>2</sup> para 146,4 W/m<sup>2</sup>, variação de 37,5 W/m<sup>2</sup>), foram significativas nas três frequências de modulação. Assim, a mudança de iluminação da ordem de, pelo menos, 37 W/m<sup>2</sup>, trouxe alterações significativas para as distâncias medidas.

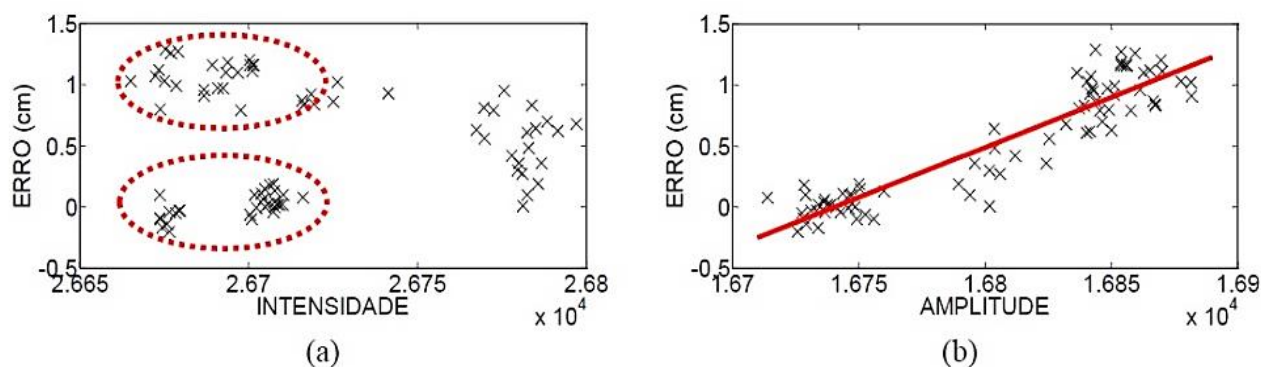
Tabela 3 - Teste de hipótese, bilateral, ao nível de significância 5%.

Mudança do Índice de Iluminação	$f_{\text{mod}} = 19 \text{ MHz}$		$f_{\text{mod}} = 20 \text{ MHz}$		$f_{\text{mod}} = 21 \text{ MHz}$	
	Estatística (Escore Z)	Conf. de 95% $Z < -1,96$ ou $Z > 1,96$	Estatística (Escore Z)	Conf. de 95% $Z < -1,96$ ou $Z > 1,96$	Estatística (Escore Z)	Conf. de 95% $Z < -1,96$ ou $Z > 1,96$
de 0 para 1	-4,33	Significativo	-1,04	Não significativo	-3,48	Significativo
de 1 para 2	1,20	Não significativo	0,00	Não significativo	0,00	Não significativo
<b>de 2 para 3</b>	<b>-14,17</b>	<b>Significativo</b>	<b>-10,86</b>	<b>Significativo</b>	<b>-7,73</b>	<b>Significativo</b>
<b>de 3 para 4</b>	<b>-12,27</b>	<b>Significativo</b>	<b>-5,48</b>	<b>Significativo</b>	<b>-10,63</b>	<b>Significativo</b>
<b>de 4 para 5</b>	<b>-5,74</b>	<b>Significativo</b>	<b>-4,82</b>	<b>Significativo</b>	<b>-5,40</b>	<b>Significativo</b>
de 5 para 6	-1,04	Não significativo	-1,19	Não significativo	-3,96	Significativo
de 6 para 7	1,33	Não significativo	1,64	Não significativo	3,92	Significativo

Após o índice 6, de 169,4 W/m<sup>2</sup>, houve saturação da imagem por excesso de iluminação.

Para modelar os erros causados pela iluminação, procurou-se fazer uso dos valores da intensidade e amplitude, também obtidos com a câmera da distância. A Figura 58a mostra a relação entre o erro de distância e a intensidade para a frequência de modulação de 19 MHz. Não foi possível ajustar os dados a nenhuma equação, uma vez que os valores de intensidade registrados para diferentes níveis de iluminação se repetiram, de modo que, para um mesmo valor de intensidade registra-se dois valores diferentes de erro. Tais conjuntos de dados são representados por elipses pontilhadas na Figura 58a.

Figura 58 – Para  $f_{\text{mod}} = 19 \text{ MHz}$ : (a) Erro de distância x Intensidade ; (b) Erro de distância x Amplitude.



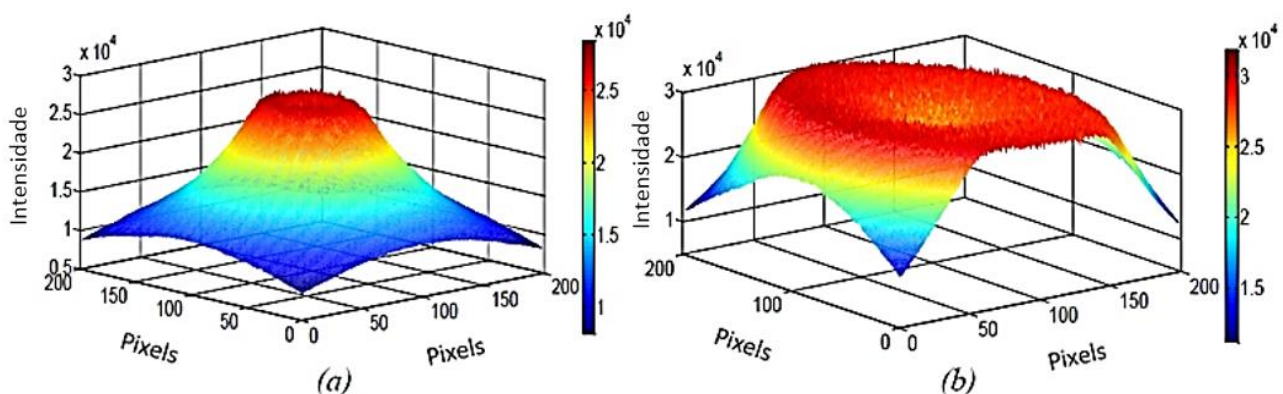
A Figura 58b mostra a relação entre o erro e a amplitude para a frequência de modulação de 19MHz, que foi modelada através de uma equação de 1º grau (Equação 49), com coeficiente de correlação linear (r) de 0,928, indicando forte correlação linear positiva.

$$Erro(A) = 0,00818858 \cdot A - 137,08085943 \quad (r = 0,928) \quad (49)$$

Utilizou-se de 8 algarismos decimais devido às diferenças de magnitudes das medidas de erro e de intensidade ou amplitude. Optou-se por manter os valores originais registrados nas imagens, sem qualquer tipo de normalização.

A repetição de valores de intensidade deve-se à saturação causada pela iluminação ambiente excessiva. Através das Figuras 59a e 59b, observa-se que há um afundamento na região central da imagem de intensidade.

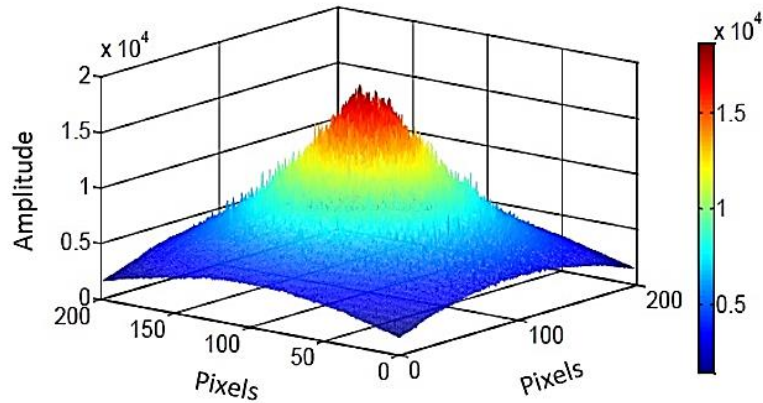
Figura 59 – Representação de duas imagens de intensidade: (a) imagem tomada no escuro; (b) imagem tomada sob iluminação máxima: aumento nos valores de intensidade e saturação na região central.



A saturação ocorreu para valores de intensidade acima de 26600, sugerindo que as imagens de intensidade da câmera PMD Camcube 3.0 são obtidas com resolução radiométrica máxima próxima a 15 bits (para  $\log_2 x = 26600$ , tem-se  $x \cong 14,7$ ).

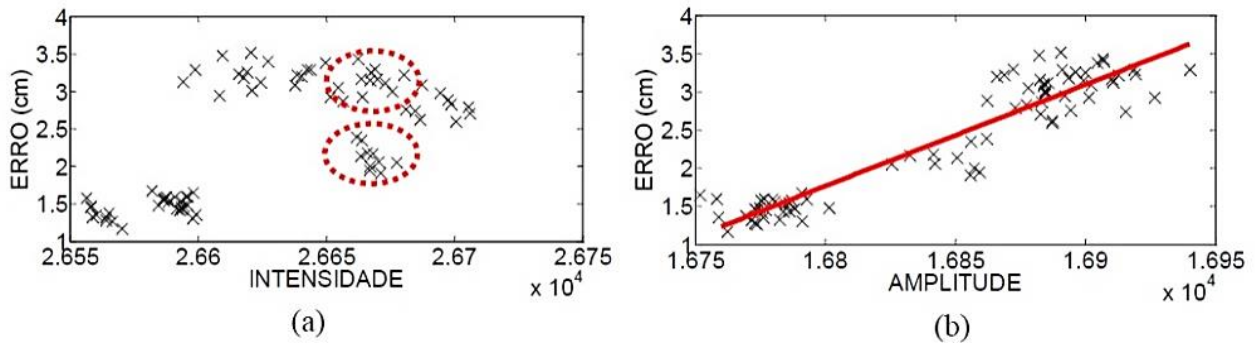
Já na Figura 60, observa-se que não houve saturação na imagem de amplitude. No centro da imagem, onde o sinal emitido é mais forte, a amplitude é maior (em vermelho), sem o afundamento ocorrido na imagem de intensidade mostrada na Figura 59b. Em direção aos bordos da imagem, radialmente, a amplitude diminui conforme diminui a incidência do sinal emitido.

Figura 60 – Representação da imagem de amplitude, sob iluminação máxima.



A Figura 61a mostra a relação entre o erro e a intensidade para a frequência de modulação de 20 MHz. Assim como para 19 MHz, também não foi possível ajustar os dados a nenhuma equação pois, para um mesmo valor de intensidade, registra-se dois valores diferentes de erro. Tais conjuntos de dados são representados por elipses pontilhadas na Figura 61a. Novamente, a repetição dos valores de intensidade é justificada pela saturação devido à iluminação ambiente excessiva.

Figura 61 – Para  $f_{mod} = 20$  MHz: (a) Erro de distância x Intensidade; (b) Erro de distância x Amplitude.

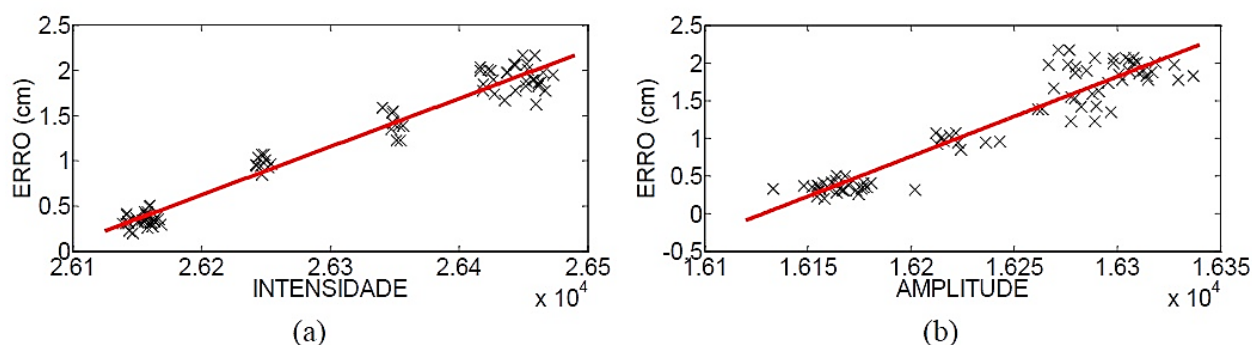


Já na Figura 61b mostra-se a relação entre o erro e a amplitude para a frequência de modulação de 20 MHz, que foi modelada através de uma equação de 1º grau (Equação 50), com coeficiente de correlação linear de 0,941, indicando forte correlação linear positiva.

$$Erro(A) = 0,01326741 \cdot A - 221,12478026 \quad (r = 0,941) \quad (50)$$

Pelas Figuras 62a e 62b verifica-se que, para a frequência de modulação de 21 MHz, o erro em função da intensidade ou em função da amplitude, foi modelado através equações de 1º grau – Equações 51 e 52, respectivamente –, obtendo valores altos para o coeficiente de correlação, uma vez que a dispersão dos valores dos erros é menor.

Figura 62 – Para  $f_{mod} = 21$  MHz: (a) Erro de distância x Intensidade; (b) Erro de distância x Amplitude.



Assim, para a frequência de modulação de 21 MHz foi possível modelar os erros através da variação da intensidade ou da variação da amplitude. Tanto a amplitude, quanto a intensidade, apresentaram forte correlação linear positiva com o erro de distância – 0,951 e 0,983, respectivamente.

$$Erro(A) = 0,01059152 \cdot A - 170,82353903 \quad (r = 0,951) \quad (51)$$

$$Erro(B) = 0,00532633 \cdot B - 138,92632435 \quad (r = 0,983) \quad (52)$$

Os modelos apresentados foram obtidos em ambiente controlado, com as configurações descritas. Para diferentes configurações, os coeficientes da reta poderão se alterar, necessitando calibração específica.

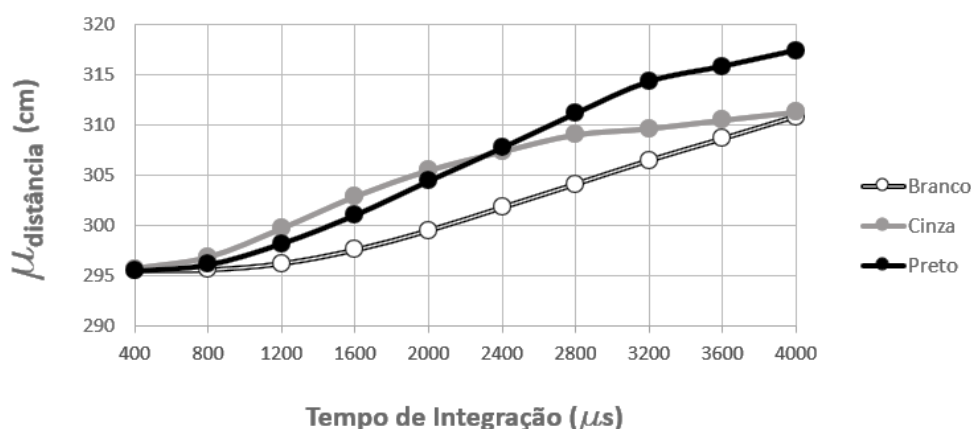
É importante salientar que o controle da iluminação incidente sobre o alvo, realizado neste experimento através do uso de um *dimmer*, desconsidera a influência da temperatura na quantidade de radiação emitida por corpos aquecidos. À medida que o *dimmer* permitia maior iluminação ambiente, também aumentava-se a temperatura do emissor – a lâmpada – e, conseqüentemente, aumentava a radiação emitida, conforme foi provado por Max Plank (Swain e Davis (1978) apud Centeno (2009)). Assim, para manter a temperatura constante

do emissor, sugere-se que o controle gradual da iluminação incidente seja feita através da variação da distância entre este emissor e o alvo.

#### 6.4 RESULTADOS DO EXPERIMENTO 3 – REFLETIVIDADE DO ALVO

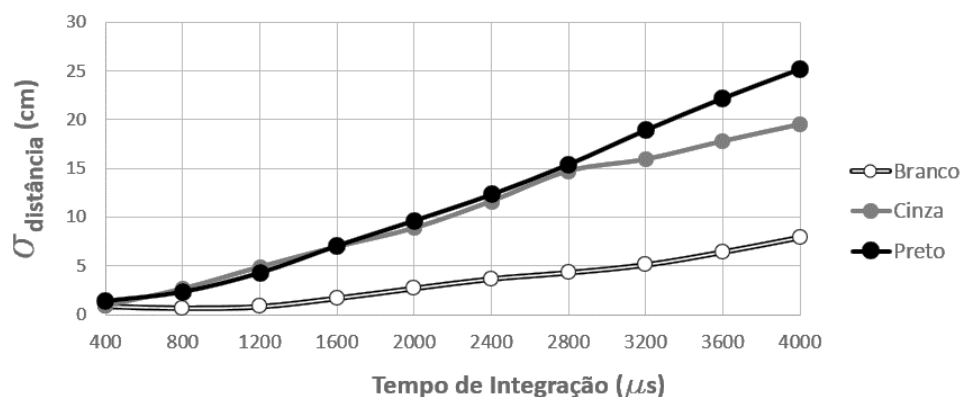
O aumento do valor do tempo de integração aumentou os valores das distâncias medidas para as três cores: branco, cinza e preto. O gráfico da Figura 63 mostra este comportamento. Os valores foram calculados a partir de uma janela 5 x 5 pixels, sem iluminação externa (no escuro). A partir de valores de TI acima de 2800  $\mu s$ , a variação foi maior para a cor preta, depois para a cor cinza e, por fim, para a cor branca. Para valores de TI abaixo de 2800  $\mu s$ , o aumento nos valores de distância foi idêntico para as cores cinza e preta.

Figura 63 – Gráfico relacionando a média da distância e o TI, para cada cor.



Da mesma forma observa-se que houve aumento no desvio padrão das medidas. Conforme o gráfico da Figura 64, o comportamento foi similar ao ocorrido para as distâncias, quando, a partir do TI de 2800  $\mu s$ , a variação foi maior para a cor preta, depois para a cor cinza e, por fim, para a cor branca. Para valores de TI menores que 2800  $\mu s$ , os aumentos nos valores de desvio padrão foram semelhantes entre as cores cinza e preta.

Figura 64 – Gráfico relacionando o desvio padrão da distância e o tempo de integração, para cada cor.



A Tabela 4 apresenta os valores referentes aos gráficos das Figura 63 e 64. Pode-se observar que a cor preta, em relação à cor branca, apresenta distâncias maiores, com diferenças que vão desde 0,5 mm (TI = 400  $\mu s$ ), passando por 4,915 cm (TI = 2000  $\mu s$ ), até 6,568 cm (TI = 4000  $\mu s$ ), conforme aumenta o tempo de integração. Ainda na Tabela 2, se observa o aumento do desvio padrão a medida que aumenta o tempo de integração, e também valores maiores para as cores mais escuras. Os desvios padrões para as cores cinza e preto, a partir de TI = 2400  $\mu s$ , são superiores a 10 cm.

Tabela 4 – Médias e Desvios Padrões das distâncias para as cores branco, cinza e preto, em função do TI.

TI	Média (cm)			Desvio Padrão (cm)		
	Branco	Cinza	Preto	Branco	Cinza	Preto
400	295,558	295,682	295,508	0,871	0,882	1,413
800	295,599	296,798	296,108	0,679	2,613	2,358
1200	296,227	299,660	298,208	0,838	4,856	4,308
1600	297,568	302,856	301,029	1,696	6,946	7,075
2000	299,497	305,449	304,412	2,701	8,863	9,654
2400	301,782	307,332	307,698	3,662	11,617	12,334
2800	304,102	309,025	311,121	4,294	14,726	15,419
3200	306,458	309,634	314,296	5,096	15,941	18,950
3600	308,610	310,488	315,805	6,397	17,804	22,224
4000	310,830	311,287	317,398	7,882	19,529	25,227

A Tabela 5 mostra os resultados de testes estatísticos para verificar, para cada cor, se a alteração do tempo de integração foi responsável pela alteração nos valores de distância. Para a cor branca, exceto para a alteração de 400  $\mu\text{s}$  para 800  $\mu\text{s}$ , nos demais casos o aumento dos valores de TI foi responsável pelo aumento nos valores da distância. Já para as cores cinza e preto, observa-se que a partir da alteração 2000  $\mu\text{s}$  para 2400  $\mu\text{s}$ , o teste indica que o aumento nos valores das distância não se deveu ao aumento nos valores de TI, ainda que os valores de distância apontem diferenças de quase 8 cm. Este resultado do teste deveu-se aos altos valores de desvios padrão para as cores cinza e preta, nos TIs acima de 2000  $\mu\text{s}$ . No caso da cor preta, na variação de 400  $\mu\text{s}$  para 800  $\mu\text{s}$ , o teste aponta “não significativo”, mas por uma pequena margem, de  $Z = -1,889$  para  $Z = -1,960$ .

Tabela 5 – Variação do TI em cada cor: teste de hipótese, bilateral, ao nível de significância 5% (confiança de 95%).

Mudança do Tempo de Integração ( $\mu\text{s}$ )	BRANCO		CINZA		PRETO	
	Estatística (Escore Z)	Conf. de 95% $Z < -1,96$ ou $Z > 1,96$	Estatística (Escore Z)	Conf. de 95% $Z < -1,96$ ou $Z > 1,96$	Estatística (Escore Z)	Conf. de 95% $Z < -1,96$ ou $Z > 1,96$
de 400 para 800	- 0,536	Não significativo	- 3,504	Significativo	-1,889	Não significativo
de 800 para 1200	- 6,494	Significativo	- 4,493	Significativo	- 3,703	Significativo
de 1200 para 1600	- 6,858	Significativo	- 3,266	Significativo	- 2,949	Significativo
de 1600 para 2000	- 6,224	Significativo	- 1,994	Significativo	- 2,448	Significativo
de 2000 para 2400	- 5,501	Significativo	- 1,116	Não significativo	- 1,816	Não significativo
de 2400 para 2800	- 4,859	Significativo	- 0,782	Não significativo	- 1,502	Não significativo
de 2800 para 3200	- 4,250	Significativo	- 0,243	Não significativo	- 1,125	Não significativo
de 3200 para 3600	- 3,260	Significativo	- 0,310	Não significativo	- 0,448	Não significativo
de 3600 para 4000	- 2,985	Significativo	- 0,262	Não significativo	- 0,410	Não significativo

A Tabela 6 mostra os resultados de testes estatísticos para verificar se a alteração da refletividade do alvo foi responsável pela alteração nos valores de distância. Na comparação entre as cores branco e cinza, e branco e preto, verificou-se que, com 95% de confiança, a refletividade foi responsável pela alteração dos valores de distância. A distância medida aumentou para cores mais escuras. Já na comparação entre as cores cinza e preto, o teste indica não ser possível afirmar que a mudança da refletividade foi responsável pelas alterações das medidas. Ainda que os valores de distância tenham diferenças de até 6 cm,



os altos valores de desvios padrão das amostras das cores cinza e preto fazem com que as populações não possam ser consideradas estatisticamente diferentes, ao nível de significância de 5%.

Tabela 6 – Comparação entre cores: teste de hipótese, ao nível de significância 5%

Tempo de Integração ( $\mu$ s)	BRANCO e CINZA		BRANCO e PRETO		CINZA e PRETO	
	Estatística (Escore Z)	Confiança de 95% Z < -1,96 ou Z > 1,96	Estatística (Escore Z)	Confiança de 95% Z < -1,96 ou Z > 1,96	Estatística (Escore Z)	Confiança de 95% Z < -1,96 ou Z > 1,96
400	-1,225	Não significativo	0,260	Não significativo	0,005	Não significativo
800	-15,194	Significativo	-1,795	Não significativo	0,020	Não significativo
1200	-35,150	Significativo	-3,909	Significativo	0,042	Não significativo
1600	-26,364	Significativo	-4,120	Significativo	0,052	Não significativo
2000	-18,037	Significativo	-4,246	Significativo	0,029	Não significativo
2400	-11,326	Significativo	-3,982	Significativo	-0,010	Não significativo
2800	-7,037	Significativo	-3,798	Significativo	-0,059	Não significativo
3200	-2,009	Significativo	-3,459	Significativo	-0,130	Não significativo
3600	1,683	Não significativo	-2,694	Significativo	-0,148	Não significativo
4000	4,583	Significativo	-2,152	Significativo	-0,170	Não significativo

## 7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A análise do erro devido à distância câmera-alvo, com diferentes distâncias e diferentes tempos de integração, mostrou a ocorrência de erros sistemáticos nas medições das distâncias.

O erro é cíclico, sendo que os erros de zero e de escala puderam ser desprezados. Este erro cíclico apresentou a mesma frequência, mas com amplitudes variáveis para os tempos de integração a partir de 600  $\mu$ s. Os tempos de integração abaixo de 500  $\mu$ s foram desconsiderados devido à baixa iluminação captada pelo sensor. Conforme os tempos de integração foram aumentando, o comportamento cíclico dos erros ficou evidente, ao passo que o aumento das amplitudes dos erros garantiu à curva a forma mais senoidal / cossenoidal. Para tempos de integração entre 2000  $\mu$ s e 4000  $\mu$ s, entre as distâncias 70 cm e 190 cm, as amplitudes dos erros tiveram variação baixa. Assim, para distâncias pequenas e tempos de integração relativamente altos, apenas a distância teve influência significativa nas amplitudes dos erros.

Esta tese apresentou a modelagem do erro de distância com dois modelos equação da onda, ajustado às observações através do método paramétrico. Os modelos diferem entre si apenas quanto a consideração da variação da amplitude ao longo da distância, onde o primeiro modelo considerou a variação linear e o segundo modelo considerou a variação como uma função exponencial de base  $e$ . A modelagem utilizando tais modelos apresentaram bons resultados, uma vez que houve redução do erro quadrático médio de 15,01cm para 2,38 cm, para o primeiro modelo, e de 15,05 cm para 3,03 cm, para o segundo modelo.

Estudos anteriores apresentaram funções matemática para modelagem, tais como *b-splines* e funções polinomiais. Frente a estes estudos, esta tese apresentou modelos com significado físico, cujos parâmetros representam propriedades do movimento ondulatório, mostrando, também, a atenuação da amplitude ao longo da distância.

Para trabalhos futuros sugere-se a utilização de outras funções de modelagem, bem como realizar a correção do erro de distância em toda a imagem, além da região central.

Referente aos erros causados pela iluminação ambiente, verificou-se que a incidência da iluminação influenciou os valores de distância calculados pela câmera, de modo que, quanto maior a intensidade da iluminação, maior o valor de distância calculada.

Verificou-se houve forte correlação linear positiva entre os erros de distância e a variação da amplitude, com valores acima de 0,9. A relação entre os erros de distância e a variação da intensidade também apresentou forte correlação linear positiva para valores de intensidade menores que 26600 – também com valores acima de 0,9 – como ocorreu para a frequência de modulação de 21 MHz. Para valores de intensidade acima de 26600, houve a saturação da imagem de intensidade, sugerindo que as imagens de intensidade da câmera PMD Camcube 3.0 são obtidas com resolução radiométrica máxima próximo a 15 bits.

A imagem de intensidade foi mais sensível à incidência de iluminação ambiente do que a imagem de amplitude. Assim, a imagem de amplitude se mostrou mais apropriada para a correção dos erros de distância, pois para as três frequências testadas não houve saturação da imagem.

Os modelos foram obtidos em ambiente controlado. Para diferentes configurações, os coeficientes da reta poderão se alterar, necessitando calibração específica. As características das fontes de erro que incidem sobre as medidas obtidas com as câmeras de distância, principalmente devido à distância câmera-alvo e ao tempo de integração utilizado, exigem a fixação de algumas variáveis.

Nos experimentos realizados nesta tese buscou-se quantificar os efeitos da variação da iluminação ambiente sobre as medidas obtidas com uma câmera de distância, através da variação gradativa da intensidade da iluminação fornecida por lâmpadas em ambiente interno. Foi possível constatar o comportamento diretamente proporcional linear entre o aumento da iluminação e o aumento no valor dos erros nas medidas, o aumento dos valores de intensidade e amplitude.

Outras pesquisas que analisaram os efeitos da iluminação ambiente, não buscaram modelar a variação gradual da iluminação ambiente sobre as medidas calculadas com uma câmera de distância. Moller et al. (2005), Khalmann (2007) e May et al (2007) buscaram corrigir os efeitos da iluminação ambiente através do aumento do valor da relação sinal/ruído, por meio da alteração de configurações no equipamento. Já Kazmi et al. (2012) e Kazmi et al. (2014) analisaram os efeitos da iluminação ambiente sobre folhas de vegetação, mostrando a importância do tempo de integração utilizado na coleta das imagens. Em nenhum destes experimentos analisou-se os efeitos da variação gradativa da iluminação ambiente, sendo a iluminação mantida fixa.

Para experimentos futuros recomenda-se a verificação dos erros para toda a imagem e a modelagem para iluminação solar, em ambiente externo. Também sugere-se que a

variação da iluminação incidente seja realizada através alteração da distância entre as lâmpadas e o alvo.

Quanto aos erros devido à refletividade dos alvos, verificou-se que, para a maioria dos tempos de integração avaliados, a mudança na refletividade do alvo alterou significativamente os valores de distância. Nos alvos escuros, de cor preta e cinza, conforme se aumentou os valores do tempo de integração, aumentou-se também os valores médios das distâncias calculadas, bem como maiores os desvios padrões das medidas, isto é, houve maior ruído na imagem nas cores mais escuras.

As alterações ocorridas na mudança da cor branca para a cor preta, ou da cor branca para a cor cinza, foram consideradas significativas. Já as alterações ocorridas na mudança da cor cinza para a cor preta, não foram consideradas significativas porque, apesar da mudança no valor da média, o alto desvio padrão – que representa matematicamente o ruído da imagem – impediu afirmar, estatisticamente, que a alteração do valor da medida viesse à mudança da refletividade do alvo.

Para a cor branca, a mudança do tempo de integração se mostrou significativa para todos os tempos de integração. Já para as cores cinza e preto, esta mudança não se mostrou significativa a partir de 2000  $\mu s$ , também devido ao alto ruído da imagem, causador do alto desvio padrão que novamente impediu afirmar, estatisticamente, que a alteração nos valores das médias das medidas fosse significativo.

Assim como em Buzolouiu e Falie (2007), os experimentos realizados nesta tese não explicaram a influência na refletividade devido a objetos no entorno do alvo analisado. Diferentemente das demais pesquisas sobre a refletividade do alvo, nesta tese verificou-se que, ainda que se aumente o tempo de integração para alvos de cores escuras, a precisão da medida não melhora. Alvos de cores claras induzem à medições mais precisas e alvos mais escuros induzem à medições menos precisas – com desvio-padrão altos. Daí verifica-se que a afirmação de Lindner e Kolb (2007) de que alvos escuros induzem a menores distâncias, ocorreu devido ao maior desvio-padrão das medidas calculadas para estas superfícies.

Em ambientes não controlados, onde existem objetos de diversas refletividades, deve-se esperar que aqueles que possuam menor refletividade estejam sujeitos à medições menos precisas com relação à objetos de maior refletividade e, se o tempo de integração for aumentado, este comportamento será ainda mais evidenciado.

Para experimentos futuros, recomenda-se utilizar mais cores intermediárias entre o branco e o preto, de modo a propiciar uma análise mais detalhada das alterações dos valores medidos.

## 8. REFERÊNCIAS

ANDERSON, Dean; HERMAN, Herman; KELLY, Alonzo. Experimental characterization of commercial flash ladar devices. In **Proceedings of International Conference on Sensing Technologies**, New Zealand, November, 2005.

BALTSAVIAS, Emmanuel P. Airborne laser scanning: basic relations and formulas. **ISPRS - Journal of Photogrammetry & Remote Sensing**, v. 54, p. 199-214, 1999.

BÜTTGEN, Bernhard; OGGIER, Thierry; LEHMANN, Michael; KAUFMANN, Rolf; LUSTENBERGER, Felix. CCD/CMOS Lock-In Pixel for Range Imaging: challenges, limitations and state-of-the-art. In: **1<sup>st</sup> Range Imaging Research Day**, Zurich, Switzerland, pp.21-32, 2005.

CAVALIN, Geraldo; CERVELIN, Severino. **Instalações Elétricas Prediais - conforme a Norma NBR 5410:2004**. Ed. Érica, 17<sup>a</sup> ed., São Paulo, 2007.

CENTENO, Jorge Antonio Silva. **Sensoriamento remoto e processamento de imagens digitais**. Ed. Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, UFPR, Curitiba, 2009.

CHIABRANDO, Filiberto; CHIABRANDO, Roberto; PIATTI, Dario; RINAUDO, Fulvio. Sensors for 3D Imaging: Metric Evaluation and Calibration of a CCD/CMOS Time-of-Flight Camera. **Sensors**, v.9, pp.10080-10096, 2009.

DALMOLIN, Quintino. **Ajustamento por mínimos quadrados**. CT/UFPR, 2<sup>a</sup> edição, Curitiba, 2009.

DORRINGTON, Adrian A.; GODBAZ, John. P; CREE, Michael J.; PAYNE, Andrew D.; STREETER, Lee V. Separating true range measurements from multi-path and scattering interference in commercial range cameras. **Proceedings of SPIE-IS&T Electronic Imaging**, v. 7864, 786404-1, 2011.

FAGGION, Pedro Luiz. **Obtenção dos elementos de calibração e certificação de medidores eletrônicos de distância em campo e laboratório**. 134 p. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2001.

FALIE, Dragon; BUZULOIU, Vasile. Noise Characteristics of 3D Time-of-Flight Cameras. **IEEE International Symposium on Signals, Circuits and Systems**, pp.1-4, 13-14 July, Romania, 2007.

FOIX, Sergi; ALENYA, Guillem; TORRAS, Carme. Lock-in time-of-flight (ToF) cameras: a survey. **IEEE Sensors Journal**, v.11, n.3, pp.1-11, 2011.

FUCHS, Stefan. **Calibration and multipath mitigation for increased accuracy of time-of-flight camera measurements in robotic applications**. 174 p. Tese (Doutorado em Engenharia). Faculdade de Engenharia Elétrica e Ciência da Computação, Universidade Tecnológica de Berlim, Berlim, 2012.

FUCHS, Stefan; HIRZINGER, G. Extrinsic and depth calibration of ToFcameras. in **Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition**, Alaska, v.5, pp.1–6, 2008.

GEMAEL, Camil. **Introdução ao ajustamento de observações: aplicações geodésicas**, Ed. UFPR, Curitiba, 2004.

GUOMUNDSSON, S. A.; AANÆS, H.; LARSEN, R. Environmental effects on measurement uncertainties of time-of-flight cameras. in **Proc. Int. Sym. Signals, Circuits and Systems**, v.1-2, Lasi, pp.113–116, July, 2007.

HEBERT, Martial; KROTKOV, Eric. 3D measurements from imaging laser radars: How good are they? **International Journal of Image and Vision Computing**, v.10, no.3, pp.170-178, April, 1992.

HUSSMANN, Stephan; HUH, P.; HERMAN, A. Systematic distance deviation error compensation for a ToF-camera in the close-up range. In **Proceedings of the IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference**, pp.1546–1550, Austria, 2012.

HUSSMANN, Stephan; KNOLL, Florian. Modulation method for minimizing the depth distortion offset of lock-in TOF cameras. **IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2mtc)**, 2013.

HUSSMANN, Stephan; KNOLL, Florian; EDELER, Torsten. Modulation method including noise model for minimizing the wiggling error of TOF cameras. **IEEE transactions on instrumentation and measurement**, v.63, n.5, 2014.

INMETRO. **Avaliação de dados de medição – Guia para a expressão de incerteza de medição**, 2008.

JAMTSO, Sonam; LICHTI, Derek. Modelling scattering distortion in 3D range camera. **International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v.38, pp.299–304, 2010.

KAREL, Wilfried. Integrated range camera calibration using image sequences from hand-held operations. **The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. XXXVIII, Part 5, Beijing, 2008.

KAREL, Wilfried; GHUFFAR, Sajid; PFEIFER, Norbert. Modelling and compensating internal light scattering in time of flight range cameras. **The photogrammetric record**, n. 27, v. 138, pp. 155–174, 2012.

KAVLI, Tom; KIRKHUS, Trine; THIELEMANN, Jeans T.; JAGIELSKI, Boris. Modelling and compensating measurement errors caused by scattering in time-of-flight cameras. In **Two-and-Three-Dimensional Methods for Inspection and Metrology VI**, v.706604, pp.1–10, 2008.

KAZMI, Wajahat; FOIX, Sergi; ALENY`A, Guillem. Plant leaf imaging using time of flight camera under sunlight, shadow and room conditions. **Proceedings of 2012 IEEE International Symposium on Robotic and Sensors Environments**. pp.192-197, Magdeburg, Alemanha, 2012.

KAZMI, Wajahat; FOIX, Sergi; ALENYA, Guillem, ANDERSEN, Hans Jorgen Indoor and outdoor depth imaging of leaves with time of flight and stereo vision sensors: analysis and comparison. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v.88, pp.128-146, 2014.

KHALMANN, Timo; INGENSAND, Hilmar; REMONDINO, Fabio. Calibration for increased accuracy of the range imaging camera swissranger. ISPRS Archives – Volume XXXVI, Part 5, **ISPRS Commission V Symposium Image Engineering and Vision Metrology**, pp.25-27, Germany, September, 2006.

KHALMANN, Timo; REMONDINO, Fabio; GUILLAUME, Sébastien. Range imaging technology: new developments and applications for people identification and tracking. In **Proceedings of Videometrics IX - SPIE-IS&T Electronic Imaging**, v.6491, 2007.

KUHNERT, Klaus-Dieter; STOMMEL, Martin - Fusion of stereocamera and PMD-camera data for real-time suited precise 3D environment reconstruction. In **Intelligent Robots and Systems (IROS)**, pp.4780–4785, 2006.



KIM, Young Min; CHAN, Derek; THEOBALT, Christian; THRUN, Sebastian. Design and Calibration of a Multi-view TOF sensor fusion system. **Computer Vision and Pattern Recognition Workshops, IEEE Computer Society Conference**, pp.1-7, 2008.

KOLB, Andreas; BARTH, Erhardt; KOCH, Reinhard, LARSEN, Rasmus. Time-of-Flight Cameras in Computer Graphics. **Computer Graphics Forum**, v.29, pp.141-149, 2010.

LANDGATE. Calibration of Eletronic Distance Measurement Instruments. Western Australian Land Information Authority. 2009. Disponível em: <[http://www.landgate.wa.gov.au/docvault.nsf/web/PS\\_Survey\\_EDM\\_Calibration\\_Software/\\$FILE/EDMCalibration.pdf](http://www.landgate.wa.gov.au/docvault.nsf/web/PS_Survey_EDM_Calibration_Software/$FILE/EDMCalibration.pdf)> . Acesso em: fevereiro, 2009.

LANGE, Robert. **3D Time-of-Flight Distance Measurement with Custom Solid-State Image Sensors in CMOS/CCD-Technology**. 139p. Dissertation (Doctor of Technical Sciences). Department of electrical engineering and computer science at University of Siegen, Germany, 2000.

LICHTI, Derek. Self-calibration of a 3D range camera. **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. XXXVII, Part B5, Beijing, 2008.

LICHTI, Derek; QI, Xiaojuan; AHMED, Tanvir. Range camera self-calibration with scattering compensation. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing** v.74, pp.101–109, 2012.

LINDNER, Marvin; KOLB, Andreas; RINGBECK, Thorsten. New Insights into the Calibration of ToF-Sensors. In **Procedures 22<sup>nd</sup> IEEE Conf. Comput. Vision Pattern Recognition**, v.1-3, pp.1603-1607, 2008.

LINDNER, Marvin; KOLB, Andreas. Calibration of the intensity-related distance error of the PMD TOF-Camera. In: **SPIE – Intelligent Robots and Computer Vision XXV**, pp.6764-35, 2007.

LINDNER, Marvin; KOLB, Andreas. Lateral and Depth Calibration of PMD-Distance Sensors. In **ISVC**, Ed. Springer, v.2, pp.524-533, 2006.

LINDNER, Marvin. **Calibration and real-time processing of time-of-flight range data**. Tese de Doutorado, Universidade de Siegen, Alemanha, 2010.

LINDNER, Marvin; SCHILLER, Ingo; KOLB, Andreas; KOCH, Reinhard. Time-of-flight sensor calibration for accurate range sensing. **Journal Computer Vision and Image Understanding**, v.114, issue 12, pp.1318-1328, Elsevier Science Inc. New York, USA, Dezembro, 2010.

LIU, Xinquiao. **Cmos image sensors dynamic range and snr enhancement via statistical signal processing**. 139p. Tese (Doutorado em Filosofia) – Department of electrical engineering and the committee on graduate studies of Stanford University, USA, 2002.

MAIA, Tule César Barcelos. **Estudo e análise de poligonais segundo a NBR 13.133 e o sistema de posicionamento global**. 175p. Dissertação (Mestrado em Transportes) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.

MAY, Stefan; PERVOELZ, Kai; SURMANN, Hartmut. 3D Cameras: 3D Computer Vision of wide scope. **Vision Systems: Applications**, Edited by: Goro Obinata and Ashish Dutta, pp. 181-202, Vienna, Austria, 2007.

MAY, Stefan; FUCHS, Stefan; DROESCHEL, David; HOLZ, Dirk; NÜCHTER, Andreas. Robust 3D - Mapping with Time-of-Flight Cameras. **International Conference on Intelligent Robots and Systems**, pp.11-15, St. Louis, USA, 2009.

MIKHAIL, Edward M. **Observations and least squares**. IEP, New York, USA, 1976.

MÖLLER, Tobias; KRAFT, Holger; FREY, Jochen; ALBRECHT, Martin; LANGE, Robert. Robust 3D measurement with PMD sensors. In: **Proceedings of the 1<sup>st</sup> Range Imaging Research Day**, ETH Zurich, Switzerland, 2005.

MURE-DUBOIS, James; HUGLI, Heinz. Real-time scattering compensation for time-of-flight camera. In **Proceedings of the ICVS Workshop on Camera Calibration Methods for Computer Vision Systems - CCMVS2007**, pp.117–122, 2007.

OLIVEIRA, Andrey Augusto Alves de. **Modelagem tridimensional de superfícies utilizando imagem ToF - estudo com a câmara PMD Camcube 2.0**. 127p. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

OLIVEIRA, Andrey Augusto Alves de; CENTENO, Jorge Antonio Silva; JUTZI, Boris. Tratamento de ruído em imagens de distância obtidas com a câmara PMD[VISION]<sup>®</sup> Camcube 2.0. **III Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação**. Recife - PE, pp.001-007, 27-30 de Julho de 2010.

OSRAM. **Manual do Curso Iluminação: Conceitos e Projetos**. Disponível em: [http://www.osram.com.br/osram\\_br/ferramentas\\_%26\\_Catlogos/\\_pdf/Arquivos/Iluminacao\\_Geral/Manual\\_do\\_Curso\\_Iluminacao%2c\\_Conceitos\\_e\\_Projetos/AF\\_apostila\\_conceitos\\_e\\_pr ojetos\\_SITE.pdf](http://www.osram.com.br/osram_br/ferramentas_%26_Catlogos/_pdf/Arquivos/Iluminacao_Geral/Manual_do_Curso_Iluminacao%2c_Conceitos_e_Projetos/AF_apostila_conceitos_e_pr ojetos_SITE.pdf). Acesso em 20.07.2013.

PIATTI, Dario. **Time-of-Flight cameras: tests, calibration and multi-frame registration for automatic 3D object reconstruction**. 160 p. Tese. Doctoral school of Environment and Territory, Politecnico di Torino, Torino, 2011.

PIATTI, Dario; RINAUDO, Fulvio. SR-4000 and CamCube3.0 Time of Flight (ToF) Cameras: Tests and Comparison. **Remote Sensing**, v.4, pp.1069-1089, 2012.

PMD Technologies. **PMD vision CamCube 3.0 Datasheet**, v. no. 20100601, 2010.

RADMER, J; FUSTE, P.; SCHMIDT, H.; KRUGER, J. Incident light related distance error study and calibration of the PMD-range imaging camera. In **Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition**. v.1–3, pp.1579–1584, Alaska, 2008.

RAPP, Holger. **Experimental and Theoretical Investigation of Correlating TOF-Camera Systems**. Thesis in Physics. Düsseldorf, Germany, 2007.

REYNOLDS, Malcolm; DOBOS, Jozef; PEELY, Leto; WEYRICH, Tim, BROSTOW, Gabriel J. Capturing Time-of-Flight Data with Confidence. **IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)**, 2011, pp.945-952, 20-25 June, 2011.

RUMSEY, Deborah. **Estatística para leigos**. Ed. Alta Books, Rio de Janeiro, 2009.

SABOV, Alexander; KRÜGER, Jörg. Identification and correction of flying pixels in range camera data. **Spring Conference on Computer Graphics (SCCG)**, Slovakia, pp.135–142, 2008.

SCHÄFER, Henrik; LENZEN, Frank; GARBE, Christoph S. Model based scattering correction in time-of-flight cameras. **Optics Express**, v.22, issue 24, pp.29835-29846, 2014.

SCHERER, Michael. The 3D-TOF-Camera as an innovative and low-cost tool for recording, surveying and visualisation - a short draft and some first experiences. **22<sup>nd</sup> CIPA Symposium**, Kyoto, Japan. October 11-15, 2009.

SCHILLER, Ingo; BEDER Christian; KOCH, Reinhardt. Calibration of a PMD-camera using a planar calibration pattern together with a multi-camera setup. **International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**. pp. 297–302, Beijing, China. 3–11 July, 2008.

SHAHBAZI, Mozhdeh; HOMAYOUNI, Saeid; SAADATSERESHT, Mohammad; SATTARI, Mehran. Range camera self-calibration based on integrated bundle adjustment via joint setup with a 2D digital camera. **Sensors**, v.11, pp.8721-8740, 2011.

SPIEGEL, Murray Ralph. **Estatística: resumo da teoria, 875 problemas resolvidos, 619 problemas propostos** – Coleção Schaum. Ed. McGraw-Hill, São Paulo, 1977.

STEIGER, Olivier; FELDER, Judith; WEISS, Stephan. Calibration of time-of-flight range imaging cameras. **Image Processing. 15<sup>th</sup> IEEE – ICIP - International Conference On SAN DIEGO**, CA, 2008.

SURVEYOR-GENERAL VICTORIA. **EDM Calibration handbook - Edition 13**. Published by the Victorian Government Department of Sustainability and Environment. Melbourne. 2012.

SWAIN, P.; DAVIS, S. **Remote sensing: the quantitative approach**. Mc.Graw-Hill, New York, USA, 1978.

TAYLOR, Stuart A. **CCD and CMOS Imaging Array Technologies - Technology Review**. Xerox Research Centre Europe Cambridge, UK, 1998.

TOME, Takashi. **Analógico versus digital: expectativas e limitações**. In: MAGNONI, Antônio Francisco; CARVALHO, Juliano Maurício de. O novo rádio: cenários da radiodifusão na era digital. São Paulo. Ed. Senac, p. 55 -91, 2010.

WEYER, Christoph A.; BAE, Kwang-ho; LIM, Kwanthar; LICHTI, Derek. Extensive metric performance evaluation of a 3D range camera. **International Society of Photogrammetry and Remote Sensing**. XXXVII, pp. 939-944, 2008.

WIEDEMANN, Matthias; SAUER, Markus; DRIEWER, Frauke; SCHILLING, Klaus. Analysis and characterization of the PMD camera for application in mobile robotics. Proceedings of the **17<sup>th</sup> World Congress - The International Federation of Automatic Control**, Seoul, Korea, July 6-11, 2008.